INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

CIENCIA Y TECNICA EN LA GUERRA FRIA

SUCEDANEOS DE LA SANGRE

LA TEORIA FUNDAMENTAL DE LA FISICA

EVOLUCION DE LAS AVES

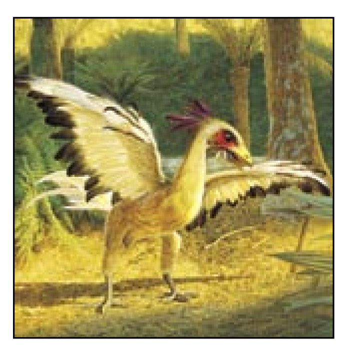


ABRIL 1998
800 PTAS.



Abril de 1998 Número 259

SECCIONES



Portada: Sano Kazuhiko

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-7	Barry Ross, a partir de Sune Villum-Nielsen
8-9	Barry Ross
10	Barry Ross; Bryan Christie, a partir de Sverre Marstrander (*canoa de guerra*)
11	Barry Ross (*arriba*); Museo del Barco Vikingo, Roskilde (*abajo*)
12	Museo del Barco Vikingo (*arriba y abajo*), Scala/Art Resource (*centro*)
13	Museo del Barco Vikingo
16-17	Ed Heck
18-19	Tomo Narashima (*arriba*), Ed Heck (*abajo*)
20	Ed Heck
22-23	Mick Ellison
24-25	Mick Ellison (*izquierda*), Ed Heck (*dibujos*)
26-27	Steve Johnson y Lou Fancher
28-30	Bryan Christie
31-32	David Fierstein
33	Dpto. de Defensa de los Estados Unidos
48-53	Dusan Petricic
54	Ed Ekcstein/*Phototake*
56	Johnny Johnson (*dibujo*); Dr. Dennis Kunkel (*eritrocito*); Manfred Kage (*basófilo* y *linfocito*); Dorothea Zucker-Franklin (*neutrófilo, eosinófilo, monocito* y *plaquetas*)
57-58	Jean Claude Revy/*Phototake*
59	Cortesía de Synthetic Blood Int.
60	Richard B. Alley
61	Steve Starr/SABA (*fondo*); Richard B. Alley (*arriba y centro*); Jennifer C. Christiansen (*abajo*)
62	Jennifer C. Christiansen (*gráficas*); Laurie Grace
64-65	Adolph Brotman (*dibujos*); Mark Twickler (*fotografías*)
66-70	Bernd Auers (*fotografías*); Jennifer C. Christiansen (*gráficos*)
71	Cortesía de CS-3, Inc. (*izquierda*), Beth Phillips (*centro* y *derecha*)
73-80	José Mª De Teresa Nogueras y M. R. Ibarra García
82	Michael Goodman
83	Johnny Johnson
84-86	David Fierstein; Jennifer C. Christiansen (*recuadro*)
88	Dusan Petricic
96	George Retseck

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Laureano Carbonell: *La nave longa vikinga*; José Joaquín Moratalla: *El origen de las aves y su vuelo*; Carmina Fuster Slump: *Ciencia y espionaje*; Juan Pedro Campos: *La teoría M*; Esteban Santiago: *Sucedáneos de la sangre*; Roberto Rodríguez Barrera: *Testigos de hielo de Groenlandia*; Manuel Puigcerver: *Contaminación en casa*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas;* José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; W. Wayt Gibbs; Alden M. Hayashi; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; David A. Schneider; y Glenn Zorpette
Marguerite Holloway, Steve Mirsky y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION Richard Sasso
PUBLISHER Joachim P. Rosler
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	11.150	20.700

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

EXPROPIACIÓN TÉCNICA. «A lo largo del último par de años, los investigadores federales han revisado todos los avances alemanes que pudieran servir para la industria americana. Sus informes, que pueden conseguirse al precio que cuesta reproducirlos, contienen descripciones de procesos, maquinaria, fórmulas, planos de instalaciones y otros datos. De semejante información se beneficiarán muchas industrias. Sin ir más lejos, los talleres de estampación de chapa metálica se interesarán por un proceso de extrusión de acero en frío, igual al de extrusión de estaño, cinc, cobre y otros metales no férreos.»

MEDICIONES NO INVASORAS. «Un nuevo calibrador de rayos X mide el espesor de acero al rojo vivo sin entrar en contacto físico con él. El aparato lanza un haz de rayos X a través de la banda de acero caliente cuando ésta abandona las cajas acabadoras del tren de laminación. A la vez, otro haz de rayos X procedente de la misma fuente penetra en una muestra de referencia estándar del grosor deseado. El instrumento compara entonces la intensidad de los dos rayos; su diferencia indica si la banda es más o menos gruesa de lo pretendido.»

...cien años

EXITO DEL SUBMARINO. «Extraordinario interés se concede a las pruebas del torpedero submarino Holland que se están desarrollando en la bahía de Nueva York. El submarino John P. Holland materializa los resultados de veinte años de trabajo experimental por parte del diseñador, quien cree firmemente que ese tipo de embarcación está destinada a convertirse en el arma más mortífera de la guerra naval del futuro. Se trata del primer submarino de su tipo construido y probado hasta la fecha. El Holland (así se llama) mide unos diecisiete metros de eslora por más de tres metros de manga, con un desplazamiento de 75 toneladas. Su casco de acero tiene forma de cigarro.» [*Nota de la Redacción: El* Holland *fue adquirido y puesto en servicio por la Armada estadounidense en 1900.*]

TELEGRAFÍA INALÁMBRICA. «En estos tiempos de tensas relaciones entre España y EE.UU., nada sería mejor bienvenido que un método práctico de efectuar comunicaciones eléctricas entre dos puntos distantes en tierra, o entre dos buques en el mar, sin que exista ninguna conexión preestablecida entre ambos lugares. Durante el pasado año, Guglielmo Marconi, estudioso italiano, desarrolló un sistema de telegrafía sin hilos capaz de transmitir señales Morse inteligibles a distancias superiores a diez millas. Sin embargo, para un inventor americano quedó la tarea de diseñar un aparato adecuado a los requisitos de la telegrafía inalámbrica su país. Tras meses de experimentación, el señor W. J. Clarke, de la United States Electrical Supply Company, ha diseñado un aparato de telegrafía absolutamente sin hilos que posiblemente no tarde nada en empezar a utilizarse.»



Un ronzal mejorado para los animales

ACEITE DE OLIVA. «Las autoridades médicas están de acuerdo sobre el valor medicinal del aceite de oliva, hallándolo asimismo un potente agente para los defectos de los conductos excretorios, especialmente los dérmicos; el eccema ha desaparecido tras interrumpir la alimentación basada en féculas y sustituirla por una dieta de frutos secos y frescos, leche, huevos y aceite de oliva. Ha tiempo que se ha observado que quienes emplean el aceite de oliva como artículo alimentario habitual disfrutan de una salud mejor.»

DIETA CANÍBAL. «Según un escritor francés, de nombre Petrie, el veinte por ciento de los caníbales se comen a los muertos para glorificarlos; el diecinueve por ciento se come a los grandes guerreros para heredar su valor, y a los niños muertos para renovar su juventud; el diez por ciento ingieren a sus parientes próximos por motivos religiosos, bien con relación a ritos iniciáticos o para glorificar a las deidades, y un cinco por ciento lo hacen por odio y por vengarse de sus enemigos. Los que devoran carne humana por hambre se estiman en un dieciocho por ciento. En resumen, si deducimos las cifras citadas, quedan sólo un veintiocho por ciento de caníbales que consumen carne humana porque la prefieren a otros alimentos.»

RONZAL FLEXIBLE. «La ilustración muestra un ronzal formado por tramos ajustables. Está pensado para que el animal pueda comer cómodamente, facilitándole una gran libertad de movimiento, dentro de los límites establecidos y evitando que se enrede con la cuerda. Tres poleas proporcionan una guía para la cuerda o cadena del ronzal, el cual está sujeto por un extremo a la brida que el animal lleva en la cabeza, y por el otro a un contrapeso.»

...ciento cincuenta años

EGIPTO ANTIGUO. «Exploradores franceses han exhumado un nuevo libro acerca de la historia del Egipto faraónico. Sobre los inmensos muros de tumbas y templos está representada fielmente la economía social al completo de los egipcios de 1800 años a.C., con todos su artes y oficios, costumbres e indumentaria de toda clase, carreras y profesiones. Esas descripciones gráficas demuestran que numerosas artes supuestamente desconocidas en la antigüedad se dominaban a la perfección: manufactura de vidrio, porcelana y tejidos finos, e imitación de piedras preciosas con vidrio. Las tablas astronómicas demuestran también que los sabios egipcios poseían el arte de dotar a los instrumentos científicos de un alto grado de perfección.»



La nave longa vikinga

Las flotas de naves longas, de manga reducida y abarrotadas de guerreros, hicieron posible que los vikingos ejercieran el dominio naval de Europa durante tres siglos, desde el 800 al 1100 de nuestra era

John R. Hale

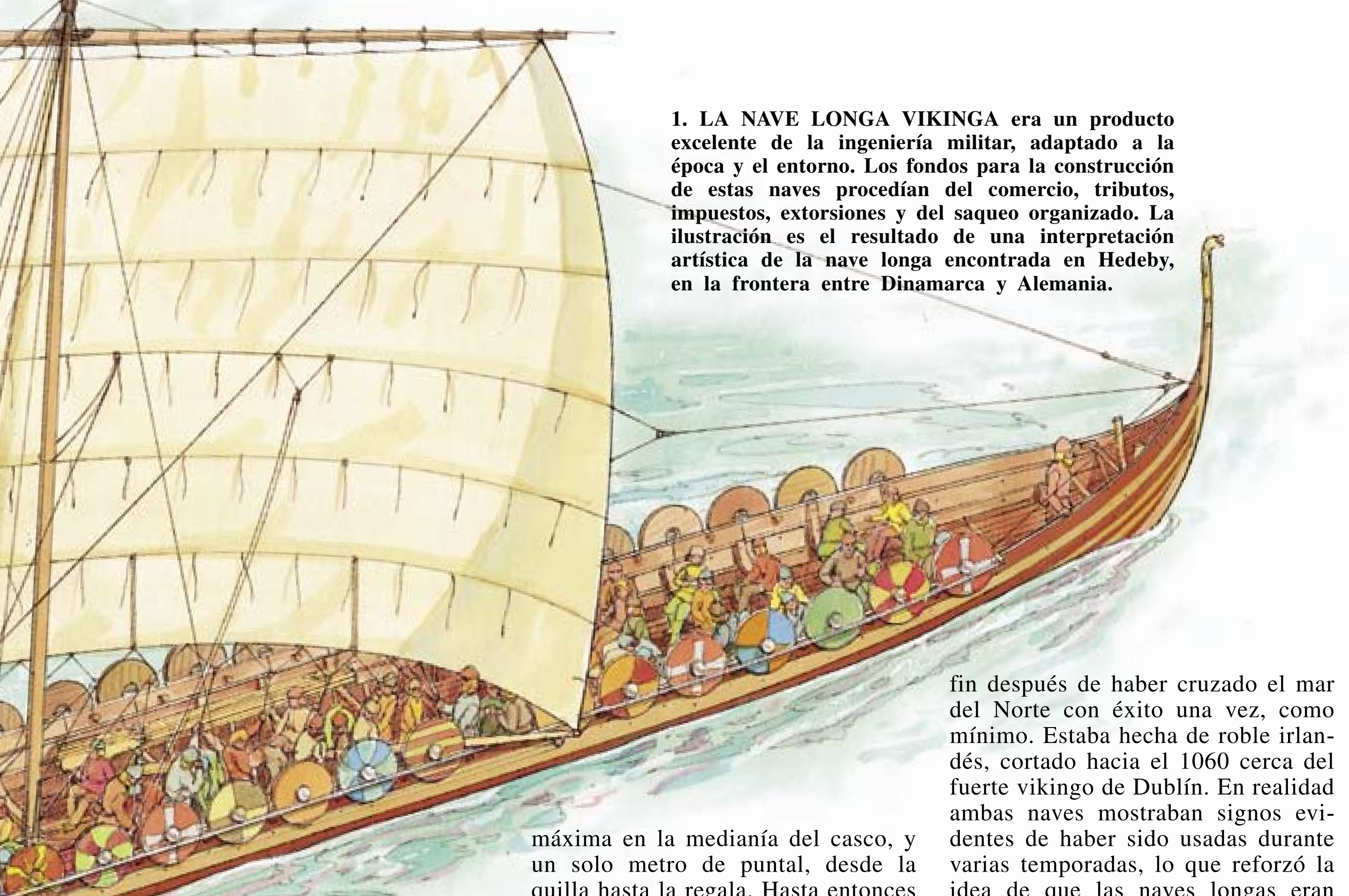
En septiembre de 1997 los arqueólogos descubrieron una nave longa vikinga enterrada en el fango del puerto de Roskilde, situado a 40 kilómetros al oeste de Copenhague. El hallazgo fue un acontecimiento comparable al que le valió al vikingo Leif Eriksson el sobrenombre de “el afortunado”. Sin que nadie lo sospechara, la nave estaba oculta muy cerca del mundialmente famoso Museo de Naves Vikingas de Roskilde y apareció durante los trabajos de dragado para la ampliación del puerto, con el fin de acoger la flota de réplicas históricas de esa institución.

Según Ole Crumlin-Pedersen, la nave debió de hundirse a causa de un temporal muchos siglos atrás y, con el tiempo, los sedimentos la cubrieron. Por el método de cronología basado en el análisis de los anillos de la madera, aplicado a las tablas de roble del hallazgo, se ha podido comprobar que la nave se construyó hacia el año 1025, en época del rey Canuto el Grande, que reunió Dinamarca, Noruega, el sur de Suecia e Inglaterra en un imperio vikingo.

Con una eslora impresionante de 35 metros, la nave de Roskilde superaba cualquiera de las halladas. Se privaba así de razón a los escépticos que consideraban las referencias a las naves grandes de las sagas noruegas una fantasía similar al mítico dragón —*drakkar*— que les daba nombre. (Las naves longas solían denominarse dragones.) Las sagas eran fidedignas, pues, cuando mencionaban las “naves grandes” de guerra vikingas.

El transcurso de un milenio no ha sido suficiente para disminuir el interés de los escandinavos por las naves longas vikingas. Su protagonismo en las incursiones por mar, que es el equivalente del término noruego *viking*, les aseguró un puesto

JOHN R. HALE, arqueólogo y director del departamento de humanidades de la Universidad de Louisville, ha realizado campañas de excavación en Escandinavia, Inglaterra, Portugal, Grecia y el valle del río Ohio. En su estudio de las representaciones de naves que nos ha legado el arte escandinavo de la Edad del Bronce, observó que las naves, consideradas por todo el mundo botes con forro de piel o cuero, eran en realidad de madera y precursoras directas de las naves longas vikingas.



1. LA NAVE LONGA VIKINGA era un producto excelente de la ingeniería militar, adaptado a la época y el entorno. Los fondos para la construcción de estas naves procedían del comercio, tributos, impuestos, extorsiones y del saqueo organizado. La ilustración es el resultado de una interpretación artística de la nave longa encontrada en Hedeby, en la frontera entre Dinamarca y Alemania.

muy destacado en la historia medieval. Las flotas de tales naves longas y poco mangudas atacaron las costas desde Northumberland hasta el Norte de Africa, llevaron emigrantes a las Islas Británicas y Normandía, y permitieron al pueblo vikingo ejercer el dominio de los mares de Europa desde el 800, aproximadamente, hasta el 1100, período que constituye la llamada Era Vikinga.

Aunque la recuperación de naves vikingas empezó en 1751 —siendo las más espectaculares las encontradas en las sepulturas reales de Gokstad y Oseberg, en Noruega—, la nave longa en sí no salió a la luz hasta 1935, cuando se excavó el montículo que cubría el enterramiento de un jefe en Ladby. El hallazgo se limitó sólo a la sombra de la nave, deduciéndose la forma del casco por la mancha oscura que había dejado en la tierra. Por fortuna, la cresta de la cabeza del dragón, hecha de hierro, junto con las siete filas de remaches de ese mismo metal de cada banda conservaron la figura de las tablas, que habían desaparecido. La nave de Ladby, de menos manga que las noruegas citadas, daba la impresión de ser muy poco marinera. Sus características principales eran: 20,6 metros de eslora, 3,2 de manga máxima en la medianía del casco, y un solo metro de puntal, desde la quilla hasta la regala. Hasta entonces los críticos descartaban las citas de las sagas que mencionaban naves de mucha más eslora y similares proporciones a las indicadas, considerándolas de poca confianza.

Las primeras tablas reales de una nave longa se encontraron en 1953 en el puerto de Hedeby, sede de un antiguo emporio vikingo muy próspero, situado cerca de la frontera alemana. Aunque la nave no se sacó del agua, el interés del público creció hasta el extremo de llevar al submarinista que la descubrió a emitir un programa de radio bajo el agua. Entre los oyentes había un joven de dieciocho años llamado Ole Crumlin-Pedersen.

Los primeros hallazgos de naves se hicieron en montículos sepulcrales, pero las circunstancias llevaron a Crumlin-Pedersen a especializarse en yacimientos de otro tipo y en particular a los asociados a desastres. Entre 1957 y 1962 participó en la dirección del equipo que recuperó dos naves longas y otras tres embarcaciones vikingas que bloqueaban el canal cerca de Skuldelev, hundidas a propósito y como último recurso por los pobladores daneses, para entorpecer la llegada de los invasores, en el siglo XI. La mayor de las dos naves longas de Skuldelev, de 29 metros de eslora, llegó a su fin después de haber cruzado el mar del Norte con éxito una vez, como mínimo. Estaba hecha de roble irlandés, cortado hacia el 1060 cerca del fuerte vikingo de Dublín. En realidad ambas naves mostraban signos evidentes de haber sido usadas durante varias temporadas, lo que reforzó la idea de que las naves longas eran mucho más marineras de lo que los estudiosos habían supuesto.

En 1979 Crumlin-Pedersen vio convertido en realidad su sueño de juventud, cuando dirigió la excavación de la nave longa de Hedeby. Esta, según pudo comprobar, acabó siendo un brulote, usado como arma ofensiva durante un ataque a la ciudad, hacia el año 1000. En este caso también, la madera era muy explícita: procedía de robles del lugar de 300 años de edad, cortados en piezas de más de diez metros de largo y sin nudos ni defectos.

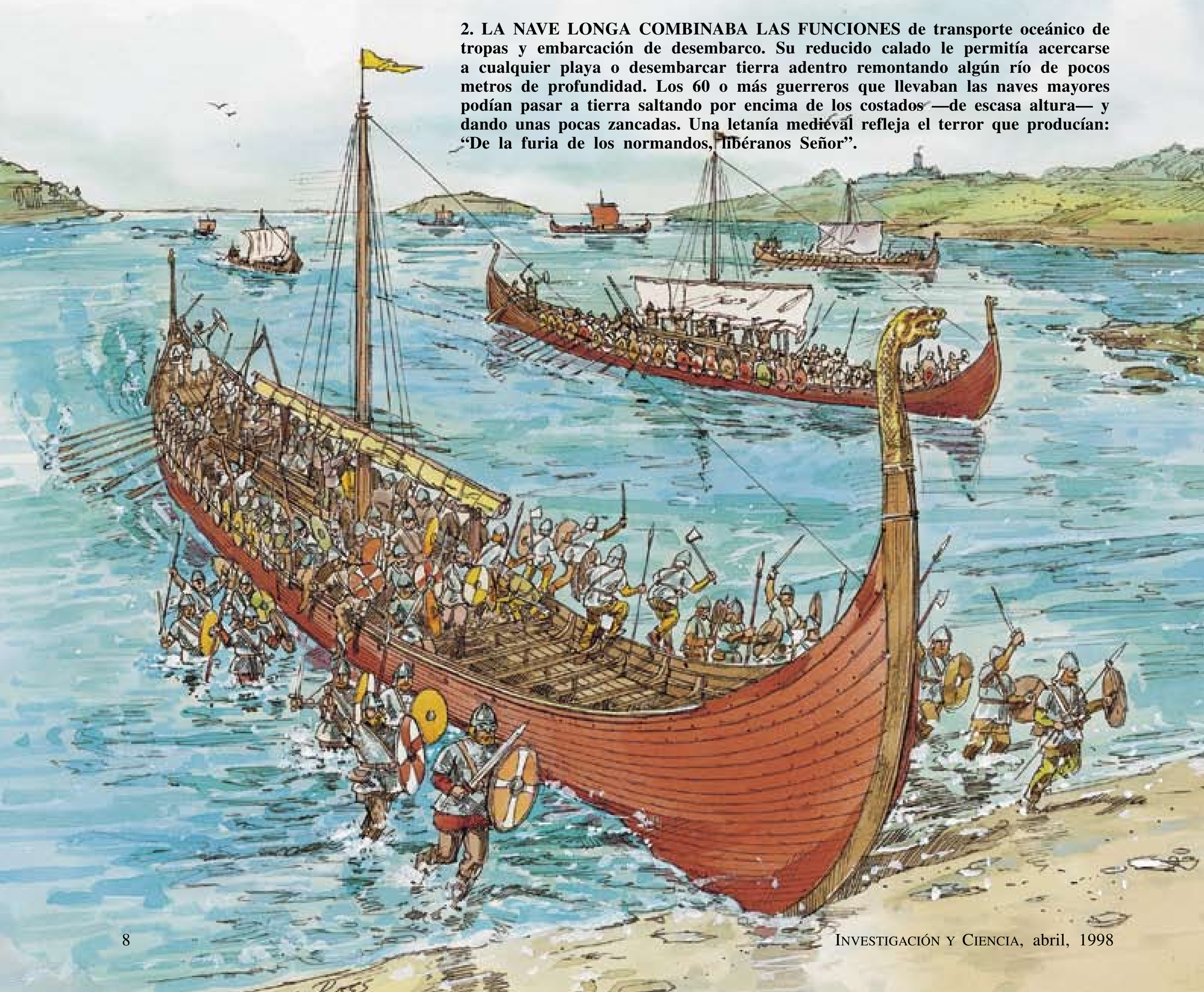
Las cinco naves longas descubiertas desde 1935 responden a tipos muy dispares. Las hay pequeñas de leva, con menos de 20 bancos, como la de Ladby y la pequeña de guerra de Skuldelev, hechas por comunidades reducidas como contribución a la corona, cuando el rey así lo requería, mediante el envío de un símbolo en forma de flecha de guerra a cada una de ellas. Las naves longas normales —de hasta 30 bancos—, como las de Hedeby y la grande de guerra de Skuldelev, eran el orgullo de los nobles y reyes vikingos, y ponen de relieve la calidad extraordinaria de cada unidad. Las “naves grandes”, mayores de 30 bancos, como la de Roskilde, aparecieron durante las guerras dinásticas de fines de la Era Vikinga.

Los hallazgos demuestran que los carpinteros de ribera vikingos, preocupados por conseguir la nave idónea para operaciones de incursión, crearon el más espectacular de todos los barcos tradicionales. La relación entre la eslora y la manga, mayor de 6:1 y que alcanzó los 11,4:1 en la nave longa de Hedeby, asociada al reducido calado, les permitía desembarcar en cualquier playa y remontar cursos de agua. Con la velocidad como objetivo, a remo y a vela, los constructores lograron asociar la robustez con la elasticidad y la ligereza, usando una tablazón de dos centímetros de grueso —la anchura de un dedo—, y eliminando el mínimo sobrante de cualquier pieza. Además, la preocupación por lograr unas unidades perfectas les llevó a hacerlas de una belleza extraordinaria, gracias a las curvas esbeltas de los extremos de proa y de popa. El texto de un cantar cortesano proclama la gracia del dragón del rey Haraldo el Duro: "Mientras los noruegos reman la serpiente, la nave remachada, descendiendo la corriente helada, se parece a las alas de un águila." Platón pudo negar la existencia de formas ideales en este mundo porque no vio ninguna nave vikinga.

La relación perfecta entre la forma, la estructura y los materiales de la nave longa no es obra de un genio creador único ni de una sola época, sino resultado de la evolución técnica a lo largo de 6000 años.

Al parecer, los primeros precursores fueron los monóxilos de la Edad de Piedra, como los encontrados en asentamientos costeros de Dinamarca, el más antiguo de los cuales se remonta al 5000 a. C. Con herramientas de piedra, los carpinteros de ribera ahuecaron los troncos de los tilos, de madera blanda y duradera, hasta convertirlos en cascos con costados de dos centímetros de grueso. Como en todo monóxilo es el propio casco quien proporciona la resistencia estructural, a la manera de un exoesqueleto genuino. Los monóxilos alcanzaron esloras de 10 metros y al parecer, propulsados con canaletes, los usaban para pescar bacalaos, cazar ballenas y en expediciones de saqueo. Posteriormente habrían de servir de ataúdes. Los creadores de los monóxilos transmitieron a sus sucesores la idea de hacer naves abiertas, ligeras, de poco calado y casco de poca manga.

Hacia el 3000 a. C. los carpinteros de ribera de orillas del río Åmose, en Dinamarca, empezaron a hacer una fila de agujeros a lo largo del límite superior de los costados de los monóxilos. Esto les permitió acoplar en esa parte una tabla con agujeros similares situados cerca del canto inferior, cosiéndola con cordel hecho de tendones o fibra vegetal. El



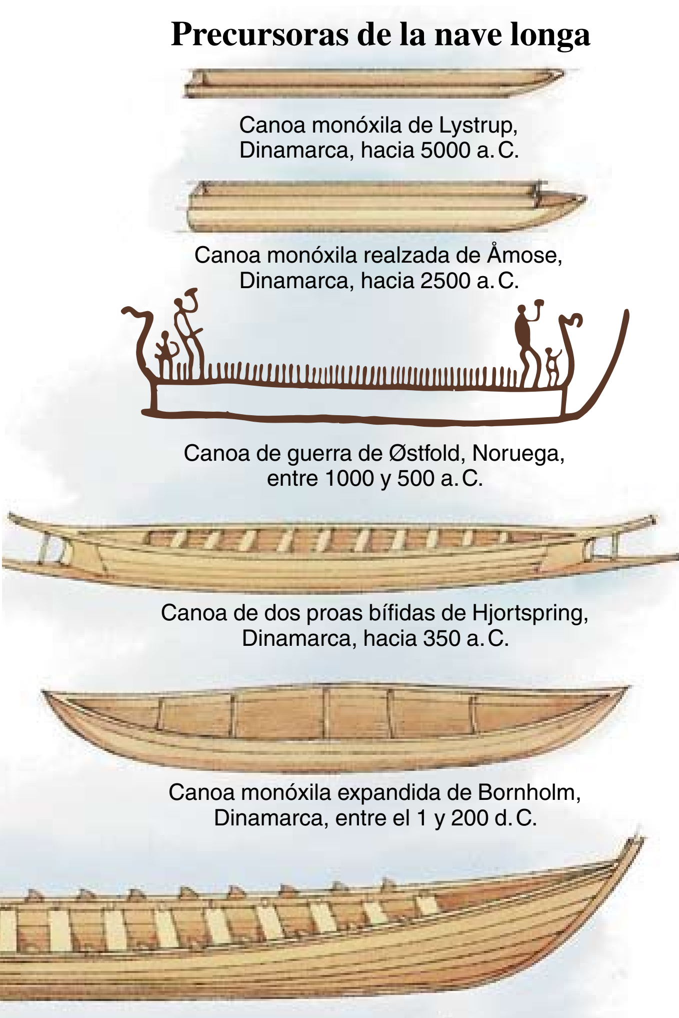
2. LA NAVE LONGA COMBINABA LAS FUNCIONES de transporte oceánico de tropas y embarcación de desembarco. Su reducido calado le permitía acercarse a cualquier playa o desembarcar tierra adentro remontando algún río de pocos metros de profundidad. Los 60 o más guerreros que llevaban las naves mayores podían pasar a tierra saltando por encima de los costados —de escasa altura— y dando unas pocas zancadas. Una letanía medieval refleja el terror que producían: "De la furia de los normandos, libéranos Señor".



El dominio de la nave longa
Principales rutas de las expediciones de las naves longas vikingas. Cualquier asentamiento costero era susceptible de ser atacado.
SHETLAND
NORUEGA
SUECIA
GOTLAND
DINAMARCA
Dublín
York
Londres
Colonia
Los vikingos avanzaron hacia el este con naves fluviales aprovechando los cursos de agua rusos.
Los vikingos llegaron también a Islandia, Groenlandia y América con naves mercantes de vela llamadas knorrs.
París
IMPERIO CAROLINGIO
(luego Reinos Francos)
Tours
Burdeos
Valence
Pisa
GALICIA
AL-ANDALUS
Lisboa
Cádiz
Hacia Bizancio



3. LOS HALLAZGOS DE NAVES LONGAS aparecen señalados en el mapa con puntos rojos. Las precursoras de ellas, con azules.



solape resultante marca el nacimiento del sistema de construcción típico del norte de Europa, conocido como "de tingladillo", caracterizado por esa disposición de las tablas. Con el añadido de dicha tabla creció el "francobordo" de la embarcación, es decir, la distancia entre la superficie del agua y el extremo superior de los costados, mejorando la navegabilidad. El hallazgo de hachas danesas de pedernal en enclaves remotos del norte de Noruega y Suecia es el mejor testimonio de los viajes de los navegantes de la Edad de Piedra.

Durante la Edad del Bronce (2000 a 500 a.C.) las embarcaciones de Escandinavia empezaron a adoptar algunos elementos característicos de las futuras naves vikingas, incluyendo los engallados remates de ambos extremos en forma de espirales o cabezas de animales. Algunas de tales cabezas eran de serpiente o de dragón, como podemos comprobar en muchas representaciones artísticas de la Edad de Bronce. Los guerreros que dotaban tales embarcaciones solían llevar un casco adornado con cuernos, que se ha convertido en el símbolo distintivo de los vikingos en óperas y películas, aunque ese casco estaba fuera de uso ya en la Era Vikinga.

Los dibujos que aparecen en las herramientas de metal y en las piedras grabadas de la Edad del Bronce muestran embarcaciones con una proyección de la quilla en el extremo de proa. Aunque este detalle no es nada familiar en embarcaciones europeas, se parece mucho al que podía observarse todavía a principios de nuestro siglo en monóxilos realzados —mediante tablas cosidas en los costados— en Siberia, Africa central y Pacífico meridional. Esa proyección constituía el extremo del monóxilo que formaba la base de la canoa. Prolongado a veces con una rama o pieza de madera curvada, servía de

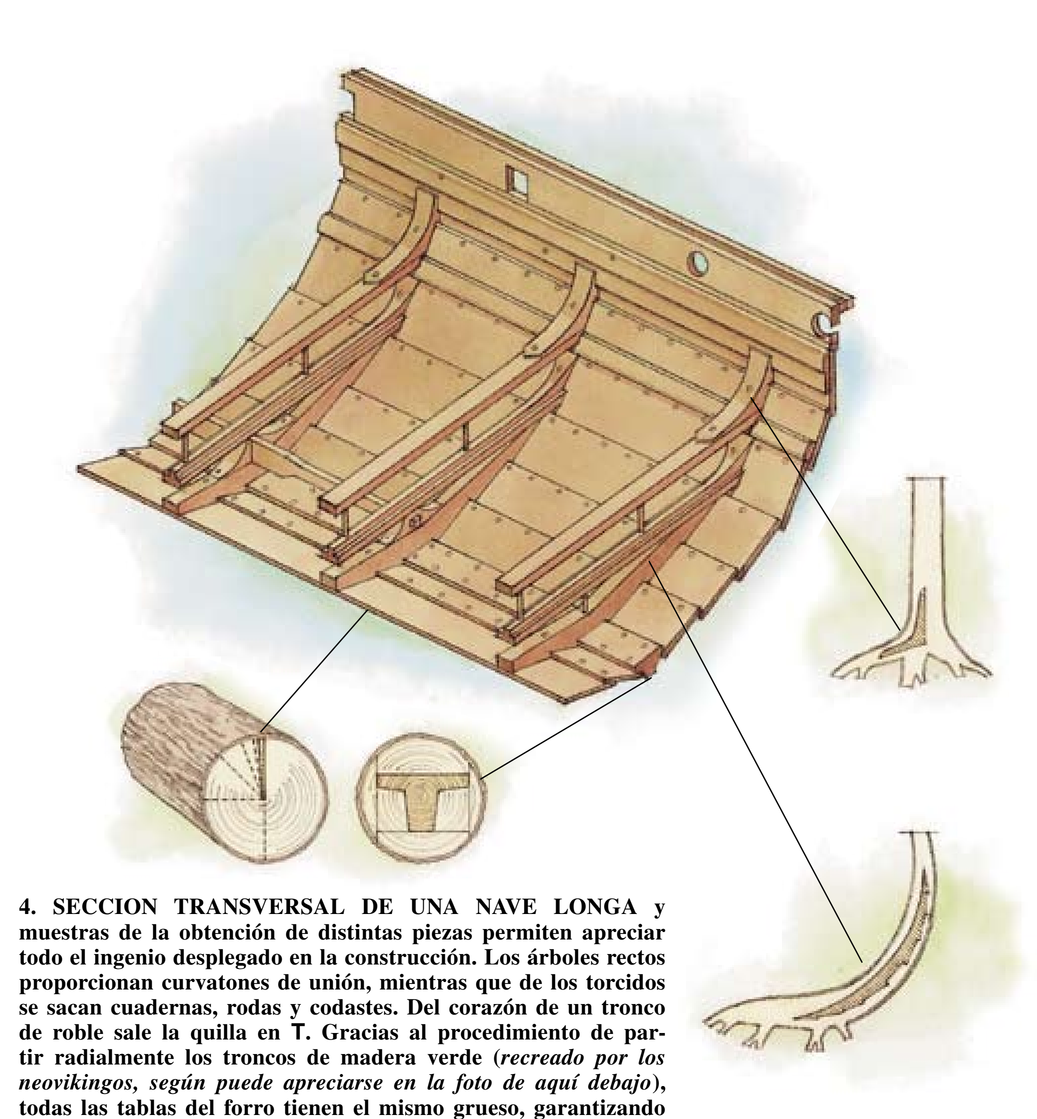
protección a la roda donde se unían las tablas de los costados formando la proa. Lógicamente, ese elemento curvo de las embarcaciones escandinavas de la Edad de Bronce llegaría a convertirse en el ornamento que culmina la prominente proa de la nave vikinga.

En un estadio intermedio, la prolongación de la quilla, asociada a la de las tablas más altas de los costados, dio lugar a la proa bífida, el elemento arquetípico de las canoas de guerra de principios de la Edad de Hierro (500 a.C. a 400 d.C.), época de clima muy severo y de grandes convulsiones económicas en Europa septentrional. Demasiado endeble para actuar como espolón, los constructores debieron de conservar esa estructura bífida como medio para asegurar mejor el conjunto del casco. Con el tiempo resultaría tan valiosa, que terminaron poniéndola en ambas cabezas, creando, en la Edad de Hierro, un primer tipo de embarcación de dos proas, es decir, de proa igual a la popa.

En un lodazal cerca de Hjortspring, en Dinamarca, se encontró una canoa de principios de la Edad de Hierro —completa, con canaletes, armas y demás equipo— construida hacia el 350 a.C. Con dos proas bífidas simétricas y espadillas de gobierno largas en ambos extremos, el bote de Hjortspring invertía el rumbo sin necesidad de virar. Esta facilidad podía significar la diferencia entre la vida y la muerte en enfrentamientos con el enemigo en ensenadas estrechas o la posibilidad de escapar rápidamente después de una incursión en una costa hostil. Durante los 1500 años siguientes, todas las naves de guerra vikingas mantendrían las dos proas del bote de Hjortspring, incluso tras la adopción del timón, palo y velas que distinguieron claramente la proa de la popa. La solución era original: incluso los romanos, pese a haber legado muy pocos comentarios sobre Escandinavia, no dudaron en mencionar las embarcaciones de dos proas.

La canoa de Hjortspring mantuvo algunas características de la Edad de Piedra, como el casco hecho de madera de tilo y la costura de las tablas con cordel de fibra. No obstante, el monóxilo de la parte inferior había desaparecido ya, conservándose una leve reminiscencia en la estrecha tabla central del fondo, ligeramente curvada y que era el primer estadio hacia la quilla vikinga. Los extremos levantados de la embarcación evitaban la entrada de agua cuando navegaba con oleaje en contra, mientras que el mayor calado del centro facilitaba las viradas. (En el futuro los constructores vikingos transmitieron ese criterio a sus herederos, más por cuestiones prácticas que estéticas. Por esta razón las naves vikingas tenían 30 centímetros más de calado en el centro que en las cabezas, un refinamiento tan sutil como el éntasis de las columnas del Partenón.)

Los veinte guerreros que paleaban la canoa de Hjortspring iban sentados por parejas en bancos dispuestos sobre cuadernas de tilo, fresno y avellano. La clara de 90 centímetros entre cuadernas proporcionaba el espacio necesario a los remeros, de modo que al convertirse esa medida en constante, los escandinavos empezaron a designar la eslora de la nave por los huecos entre cuadernas o bancos. Las cuadernas, tan espaciadas, y las tablas delgadas del forro conferían al casco una flexibilidad



4. SECCION TRANSVERSAL DE UNA NAVE LONGA y muestras de la obtención de distintas piezas permiten apreciar todo el ingenio desplegado en la construcción. Los árboles rectos proporcionan curvatones de unión, mientras que de los torcidos se sacan cuadernas, rodas y codastes. Del corazón de un tronco de roble sale la quilla en T. Gracias al procedimiento de partir radialmente los troncos de madera verde (*recreado por los neovikingos, según puede apreciarse en la foto de aquí debajo*), todas las tablas del forro tienen el mismo grueso, garantizando la robustez y resistencia uniforme de todo el casco.





5. LA NAVE VIKINGA de mayor eslora fue excavada en 1997. Se encontró en un yacimiento situado al lado mismo del Museo de Naves Vikingas, en Roskilde, un lugar ideal para el equipo de científicos dirigido por Morten Gøthche. Los dos que aparecen en la foto trabajan desde una plataforma situada por encima de los restos de madera de roble empapados de agua.

extraordinaria; al igual que en el monóxilo ancestral, era el forro, y no la estructura de cuadernas, quien daba robustez al conjunto. Esa misma flexibilidad permitía a la canoa de Hjortspring, lo mismo que a las naves vikingas posteriores, hacer su camino contorneándose en el agua como si se tratara de un ser vivo.

A fines de la Edad de Hierro se produjo un cambio en la técnica. En virtud del mismo, la estructura compleja de cierre que se aprecia en los extremos de la canoa de Hjortspring dejó de evolucionar en esa línea, para adoptar una solución mucho más elegante y simple. De acuerdo con Crumlin-Pedersen, la solución surgió con la canoa monóxila expandida, que aparece en los enterramientos de la Edad de Hierro existentes en la isla danesa de Bornholm. Como es natural, los constructores de monóxilos de todo el mundo se han encontrado con árboles demasiados delgados para hacerlos. En cada lugar, y de forma independiente, idearon procedimientos de vaciar el tronco convirtiéndolo en una especie de tubo abierto a lo largo, de paredes tan delgadas como podían, para luego ir expandiendo los costados gradualmente mediante la aplicación de calor e introduciendo entre ellos piezas de madera cada vez más largas. A medida que los costados ganaban en anchura los extremos del monóxilo se iban curvando ligeramente hacia arriba, adoptando una figura grácil y simétrica: en ella se inspiró la futura nave vikinga.

La embarcación encontrada en Nydam, al norte de Hedeby, hecha de tablas dispuestas en tingladillo, es la muestra más antigua que ha llegado hasta nosotros de la evolución de la canoa monóxila expandida de Bornholm y de la canoa de Hjortspring. Dicha embarcación de Nydam, construida hacia el 300 d.C., constituye en muchos aspectos un nuevo punto de partida. Las tablas del forro, cuadernas y maderos de proa y popa eran de roble; los remaches de hierro vinieron a sustituir las costuras de las unidades anteriores; y la tripulación iba sentada mirando hacia popa, mientras la impulsaba con remos largos apoyados en las chumaceras de la regala. Pero lo más importante eran las cinco tracas de cada costado, que se extendían a lo largo de la eslora, formando la roda y el codaste ligeramente curvados, definidores de las naves vikingas.

Otro cambio aún más revolucionario se produjo hacia el 700, un siglo antes de las primeras incursiones importantes de los vikingos. Una embarcación encontrada en Kvalsund, en el oeste de Noruega, muestra ya el embrión de una quilla; la estrecha tabla central del fondo, al adoptar una sección en T, se transformó en ella. El timón lateral fijo, descendiente de la espadilla de gobierno dispuesta en una aleta en las canoas de época anterior, actuaba también de estabilizador de la nave al proyectarse por debajo del casco y reducir el abatimiento, como sucede con una orza de deriva moderna. Las tracas, ahora de tablas más estrechas y en número de ocho, permitían obtener las curvas más complejas de las naves longas. Los escandinavos, aunque robustos, aceptaban estoicamente el aumento del rezumeo de agua de tales costuras. Una ley noruega consideraba inútil la





6. LOS METODOS de construcción vikingos aparecen ilustrados en el Tapiz de Bayeux, del siglo XI (*arriba*) que se conserva en el museo dedicado a esas creaciones en dicha ciudad. Por otro lado, esa técnica se ha podido confirmar en la construcción de réplicas (*abajo*). Las muescas de las piezas de madera originales demuestran que la herramienta usual era el hacha, en vez de la azuela o sierra.



7. LA QUILLA relativamente ligera de la nave longa facilitaba el transporte por tierra. En la foto unos caballos arrastran la *Helge Ask* sobre los parales. Esta facilidad permitió al rey noruego del siglo XI Magnus ganar todo un territorio. Magnus, de acuerdo con el pacto que había hecho con el rey de Escocia, tenía derecho a ocupar todo el territorio que fuera capaz de circunnavegar. El noruego navegó hasta la península de Kintyre y una vez allí permaneció sentado asiendo el timón, mientras sus hombres hacían deslizar la nave a través de ella, de modo que la conservó en su poder.

embarcación que requería achicar el agua del interior tres veces en dos días. (De todos modos la tripulación era libre de asumir el riesgo.)

La quilla de la nave de Kvalsund y el timón lateral fueron testigos de la llegada e implantación de unos elementos fundamentales para la evolución del buque: el palo y la vela. Las estelas de piedra grabadas de la isla sueca de Gotland empezaron a representar naves con velas hacia el 700, aunque el primer resto físico de un mástil no aparece hasta la nave real construida hacia el 815 y enterrada en Oseberg unos veinte años más tarde. Es curioso comprobar la demora en adoptar la vela por parte de los vikingos; sobre todo, si tenemos en cuenta que las naves de vela celtas recorrían las costas de Escandinavia desde tiempos de César y la vela en sí había venido evolucionando a lo largo de cuatro milenios. Arne Emil Christensen, autoridad indiscutida en naves vikingas primitivas e introducción de la vela, supone que la resistencia a adoptarla fue una cuestión de índole cultural más que técnica: una obstinación de los remeros. Los vikingos viejos de aquella época, escribe Christensen, quien los imagina burlándose de sus hijos, "debieron despreciar a los jóvenes, por ser demasiado perezosos para remar como ellos y preferir navegar por efecto del viento". De todos modos, en viajes largos, las ventajas de la vela se impusieron.

Un palo o percha encapillado por un extremo a un puño bajo de la vela permitía orientarla debidamente y hacer que la embarcación navegara ciñendo. A remo, los antecesores inmediatos de los vikingos habían llegado hasta Rusia, por el este, y a las mismas islas Británicas, por el oeste, pero al imponerse la vela el instinto bélico de los vikingos se despertó. La vela produjo la mayor parte de la evolución final de las naves vikingas, favoreciendo la introducción de unidades de más calado, con casco de más manga y costados más altos. Las naves longas vikingas, descendientes directas de las canoas de la Edad de Piedra, se vieron pronto rodeadas de una gran familia de tipos de naves similares, por efecto del potencial evolutivo asociado al palo y la vela. Las formas nuevas proliferaron, y al igual que los pinzones observados por Darwin en las Galápagos, se adaptaron a cualquier nicho ambiental. Muchos de los tipos nuevos eran naves de vela especializadas para el transporte, la exploración y colonización, como los famosos *knorrs*: naves robustas con grandes bodegas que transportaron a los vikingos a través del Atlántico hasta América. Como naves funerarias, toda esa variedad de embarcaciones y botes llevaron a los vikingos paganos en su viaje final; allí donde las naves no podían ir, tanto en este mundo como en el otro, los vikingos tampoco iban.



8. LA PROA DE LA *HELGE ASK* recuerda una cabeza de dragón. El aspecto feroz de la nave longa vikinga era un arma muy poderosa.

Los botes menores descendientes de los tipos vikingos han persistido a lo largo de los siglos, transformados en embarcaciones de carga o de servicio en las islas del oeste de Noruega o los lagos suecos. Pero poco después del año 1100, la coca hanseática, de fondo plano, se convirtió en la base de un nuevo tipo de veleros grandes, llegando incluso a la categoría de naves reales de algunos monarcas escandinavos. La nave longa vikinga, proyectada para incursiones, no pudo competir en un mundo de ciudades portuarias fortificadas, guerra naval organizada y reyes que requerían la pompa y comodidad de una cámara durante su permanencia a bordo. La última leva para la flota de guerra vikinga tuvo lugar en 1429 y fue derrotada por otra de siete cocas. El dragón se retiró y buscó refugio en el reino de la leyenda.

A partir del *Viking* del capitán Magnus Andersen, en 1893 —una réplica de la nave noruega de Gokstad—, ha habido una larga sucesión de reconstituciones que han demostrado las sorprendentes cualidades marineras y robustez de las naves de carga y de vela vikingas. ¿Podría la reproducción de una nave longa llegar a las mismas conclusiones?

En 1963 un grupo de muchachos de la asociación de exploradores daneses construyeron una réplica de la nave de Ladby. Observando que las naves de guerra ilustradas en el tapiz de Bayeux, del siglo XI, permitían el transporte de caballos, los jóvenes marineros decidieron comprobar si podían subirlos a bordo desde la playa. En caso afirmativo esto justificaría la tendencia a hacer las naves con poco francobordo a lo largo de toda la Era Vikinga. Las pruebas de mar de la nave de Ladby fueron un éxito total, en las que caballos, jóvenes y casco se comportaron todos perfectamente bien. Sorprendentemente la nave demostró ser muy marinera y manejable en mar abierto, lo que ponía de relieve la habilidad y el ingenio de los constructores navales vikingos.

Tras la recuperación de las naves de Skuldelev en 1962, se construyó el Museo de Naves Vikingas en Roskilde, con el propósito de exponerlas y formar un centro dedicado a su estudio y reconstrucción. En 1991 los investigadores de dicha institución construyeron la *Helge Ask*, una réplica exacta de la menor de las naves longas de Skuldelev —de 17 metros de eslora—, que vino a demostrar la capacidad operativa de tal unidad. Incluso llevando sólo la mitad de los 24 remeros, la nave dejó atrás a otra réplica de una nave de carga, de mucha más manga, similar a la encontrada también en Skuldelev y nombrada *Roar Ege*. A vela, la nave longa superó también a la de carga.

Aunque la nave de carga ceñía mejor, la tripulación de la *Helge Ask* podía superarla arriando la vela rápidamente y poniéndose al remo. Crumlin-Pedersen calcula que la nave longa alcanzaba cualquier presa en cualesquiera condiciones de tiempo, salvo en pleno temporal. Las sagas recogen una prueba de esta capacidad. Cierto vikingo llamado Gauti Tófason dio caza a cuatro *knorrs* daneses con su nave longa. Y estaba a punto de capturar el quinto cuando se desencadenó el mal tiempo, en cuyo momento la presa logró escapar.

Desde fines del siglo pasado se han reconstituido más de 30 naves vikingas, que una hueste de neovikingos se encarga de cuidar y mantener en servicio. En Roskilde, los investigadores utilizan la *Helge Ask*, en verano, para hacer pruebas de mar y navegar, así como desplazarla por tierra para comprobar los relatos de movimientos de ese tipo, mientras el invierno lo dedican a efectuar las reparaciones pertinentes. Un milenio después de la construcción de las naves longas originales, el robusto vigor expansivo de los vikingos se manifiesta de nuevo en la mar.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE VIKING SHIPS. A. W. Brøgger y Haakon Shetelig. Twayne Publishers, Nueva York, 1971, y C. Hurst, Londres, 1971.

PLANK-BUILT IN THE BRONZE AGE. John R. Hale, en *Antiquity*, vol. 54, n.º 211, págs. 118-126; 1980.

SAILING INTO THE PAST: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SEMINAR ON REPLICAS OF ANCIENT AND MEDIEVAL VESSELS. Dirigido por Ole Crumlin-Pedersen y Max Vinner. Viking Ship Museum, Roskilde, 1986.

THE EARLIEST SHIPS: THE EVOLUTION OF BOATS INTO SHIPS. Dirigido por Robert Gardiner y Arne Emil Christensen. Naval Institute Press, Annapolis, 1996.

VIKING-AGE SHIPS AND SHIPBUILDING IN HEDEBY/HAITHABU AND SCHLESWIG. Ole Crumlin-Pedersen. Viking Ship Museum, Roskilde, y Provincial Museum of Archaeology, Schleswig, 1997.

El origen de las aves y su vuelo

El análisis anatómico y aerodinámico de especies fósiles y actuales nos revela que las aves evolucionaron a partir de dinosaurios carnívoros pequeños y moradores del suelo

Kevin Padian y Luis M. Chiappe



Hasta hace poco, el origen de las aves constituía uno de los grandes misterios de la biología. Difieren manifiestamente del resto de los organismos. Plumas, picos sin dientes, huesos huecos, pies prensiles, huesos del deseo, esternón vigoroso y espolones son componentes de una combinación de caracteres esqueléticos que ningún otro animal vivo comparte. Pues bien, más difícil resulta incluso hacerse una idea de los mecanismos evolutivos del plumaje y el vuelo.

Ello no ha impedido, sin embargo, que los hallazgos de nuevos fósiles y métodos de investigación de los últimos 20 años permitiera a los paleontólogos establecer que las aves descienden de los terópodos, dinosaurios carnívoros moradores del suelo. De la investigación ha derivado también una explicación coherente acerca de la conquista del aire por las aves primitivas.

En 1859 Charles Darwin proponía su teoría de la evolución en *El origen de las especies*. Un año después, zoólogos y paleontólogos comenzaron ya a plantearse la historia evolutiva de las aves, a raíz del hallazgo de una pluma solitaria de un ave en depósitos calizos de Baviera. Tenían éstos unos 150 millones de años (justo antes de que el período Jurásico dejara paso al Cretácico). En 1861, en la misma región, se encontró el esqueleto de un animal que tenía plumas y alas como las de un ave, aunque contaba también con una cola muy larga y dientes. Se trataba de los dos primeros ejemplares de *Archaeopteryx lithographica*, la especie más arcaica y basal de cuantas se conocen de las aves.

La anatomía esquelética de *Archaeopteryx* ofrece una demostración clara del origen dinosaurio de las aves. Pero en 1861 los expertos no estaban todavía en condiciones de establecer esa relación de descendencia. Pocos años después, Thomas Henry Huxley, tenaz defensor de Darwin, vinculaba las aves con los dinosaurios. Comparando las extremidades posteriores de *Megalosaurus*, un terópodo gigante, con las de los avestruces, observó que ambos compartían 35 caracteres, lo que no acontecía con ningún otro animal. De ello extrajo la conclusión de que las aves y los dinosaurios podían estar estrechamente emparentados, aunque ignoramos si pensaba que fueran primos —dos linajes descendientes de un precursor común— o si las aves procedían de los dinosaurios.

Huxley presentó sus resultados a la Sociedad Geológica de Londres en 1870. Pero Harry Govier Seeley, paleontólogo, rechazó el parentesco entre terópodos y aves. Seeley pensaba que la similaridad de los miembros posteriores de avestruces y *Megalosaurus* debíase verosímilmente a que ambos, grandes bípedos, utilizarían las extremidades de un modo parecido. Aducía, además, que los dinosaurios eran mayores que las aves y ninguno de ellos podría volar; ¿cómo iban, pues, a descender de los dinosaurios las aves voladoras?

El misterio del origen de las aves ganó renovada atención medio siglo después. En 1916 Gerhard Heilmann publicó un libro brillante sobre el origen de las aves. Sostenía que, por su anatomía, las aves se aproximaban más a los terópodos que a cualquier otro grupo fósil; con una inexcusable discrepancia, sin embargo: estos dinosaurios carecían de clavículas, los dos huesos que en las aves se fusionan formando el hueso del deseo o fúrcula. Puesto que otros reptiles sí presentaban clavículas, Heilmann dedujo que los terópodos las habían perdido. Para él, esta pérdida significaba que las aves no habían evolucionado de los terópodos, convencido como estaba (erróneamente según veremos después) de que un carácter perdido durante la evolución no podía recuperarse. Las aves, decía, evolucionarían de un grupo reptiliano más antiguo que poseyera clavículas. Igual que se expresara Seeley, Heilmann atribuía las semejanzas entre aves y dinosaurios al bipedismo de ambos grupos.

Las tesis de Heilmann calaron, pese a nuevos indicios que reclamaban una explicación diferente. Dos hallazgos





1. LAS AVES PRIMITIVAS que vivieron hace más de 100 millones de años diferían de las actuales. Como reflejan estas reconstrucciones artísticas, algunas presentaban garras en los dedos de las manos y mandíbulas con dientes, típicas de los dinosaurios no avianos. *Sinornis* (*izquierda*) se halló en China; *Iberomesornis* y *Eoalulavis*, en España. Estos tres pájaros venían a ser de la talla de un gorrión. *Eoalulavis* es el primer caso conocido de álula o "ala del pulgar", una adaptación que les facilita la navegación lenta.

De los dinosaurios a las aves

El dendrograma representado traza el linaje de las aves desde sus antepasados dinosaurianos. Este árbol, conocido también como cladograma, es resultado de la aplicación del método que se toma por canónico hoy para el parentesco evolutivo entre animales, la cladística.

Los cladistas determinan la historia evolutiva de un grupo a partir del examen de ciertos tipos de caracteres. Durante la evolución, alguien adquirirá un nuevo carácter que transmitirá a sus descendientes. Dos grupos que compartan esas novedades o caracteres derivados guardarán, para los paleontólogos, un parentesco más estrecho entre sí que con otro grupo que carezca de ellos.

Los nodos o puntos de ramificación de un cladograma señalan la aparición de una línea que reúne una nueva serie de caracteres derivados. En este cladograma, los terópodos proceden de un precursor dinosaurio que poseía ya huesos huecos y sólo tres dedos. Los terópodos siguen siendo, vale decir, un subgrupo dentro de los dinosaurios saurisquios. Cada línea o clado se incluye en otro mayor (*rectángulos de color*). Por lo mismo, las Aves son manirraptores, tetanuros y dinosaurios terópodos. *—K. P. y L. M. C.*

Titanosaurus

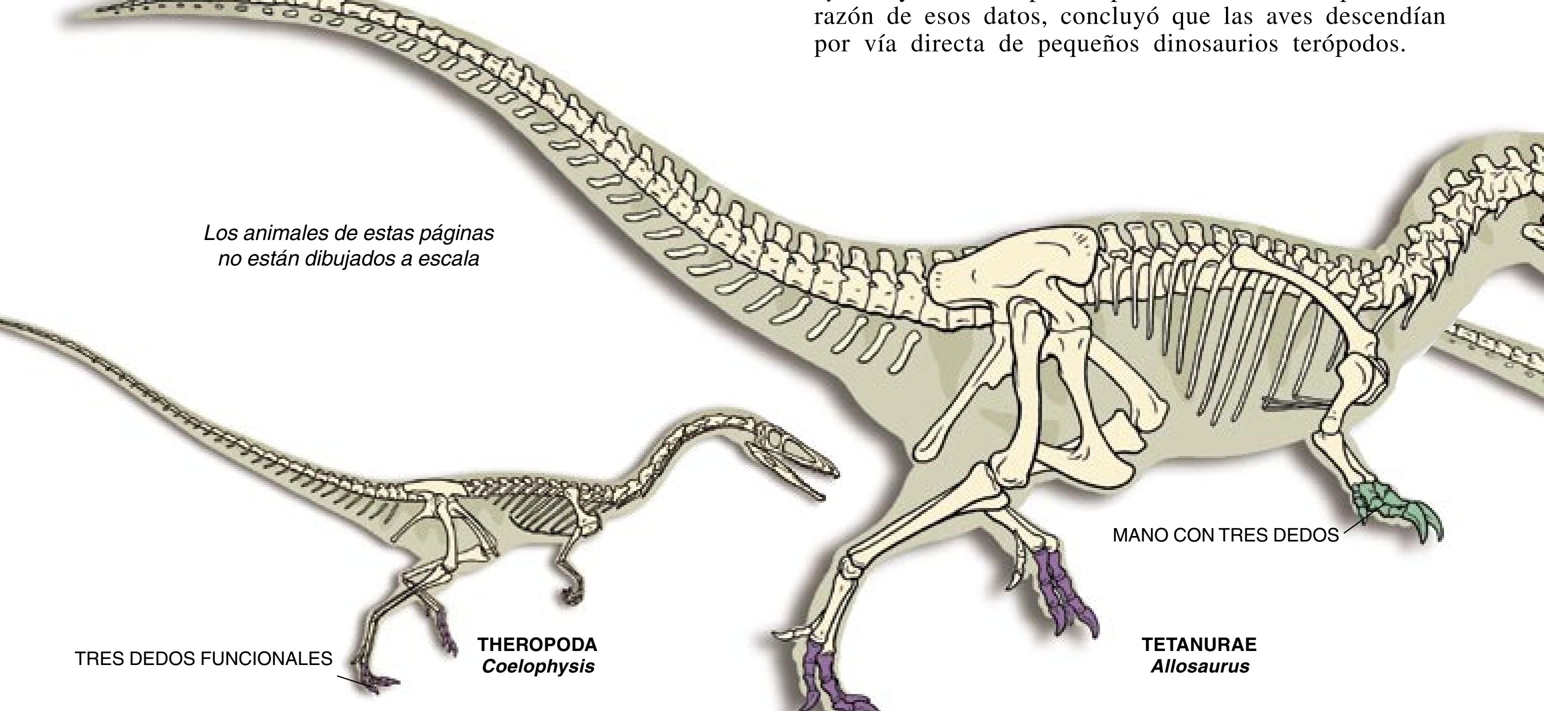
LINAJES DE DINOSAURIOS QUE NO DESEMBOCARON EN LAS AVES

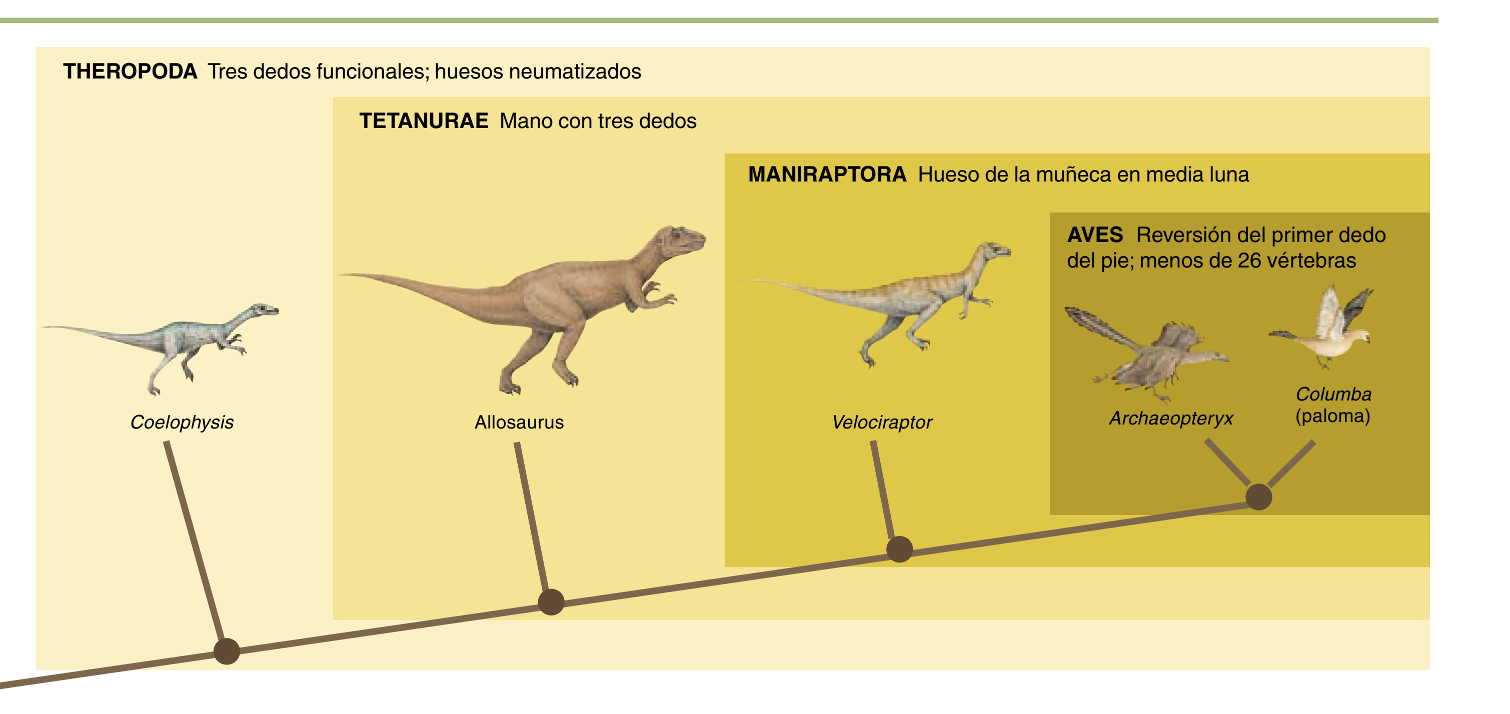
DINOSAURIA

SAURISCHIA

independientes demostraron que los terópodos poseían clavículas. En 1924 se publicó un dibujo anatómico de *Oviraptor*, terópodo con cabeza de loro, que mostraba la presencia de fúrcula, pero la estructura no se identificó acertadamente. Más tarde, en 1936, Charles Camp encontró los restos de un pequeño terópodo del Jurásico inferior, con clavículas incluidas. Se había desvanecido la objeción letal de Heilmann, por más que fueran pocos los que lo reconocieran. En los últimos tiempos se han recuperado clavículas de terópodos muy diversos, emparentados con las aves.

Un siglo después de la polémica presentación de Huxley ante la Sociedad Geológica de Londres, John H. Ostrom recuperaba la idea del parentesco de las aves con los dinosaurios terópodos: las aves descendían por vía directa de los terópodos, sin más rodeos. A finales de los sesenta Ostrom había descrito el esqueleto del terópodo *Deinonychus*, depredador feroz del tamaño de un humano adolescente, con garras falciformes, que pululaba por Montana hace unos 115 millones de años (Cretácico inferior). En una serie de trabajos publicados más tarde, Ostrom identificó numerosos caracteres que las aves, *Archaeopteryx* incluida, compartían con *Deinonychus* y otros terópodos, pero no con otros reptiles. En razón de esos datos, concluyó que las aves descendían por vía directa de pequeños dinosaurios terópodos.

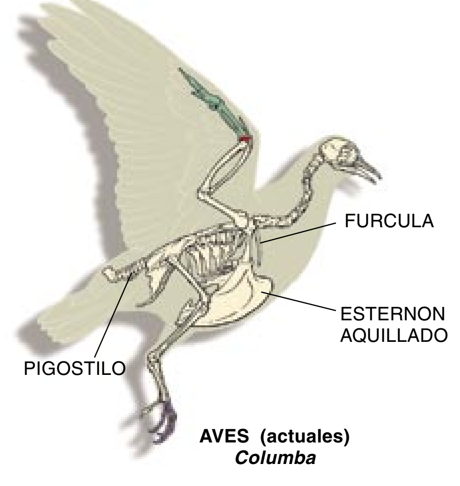


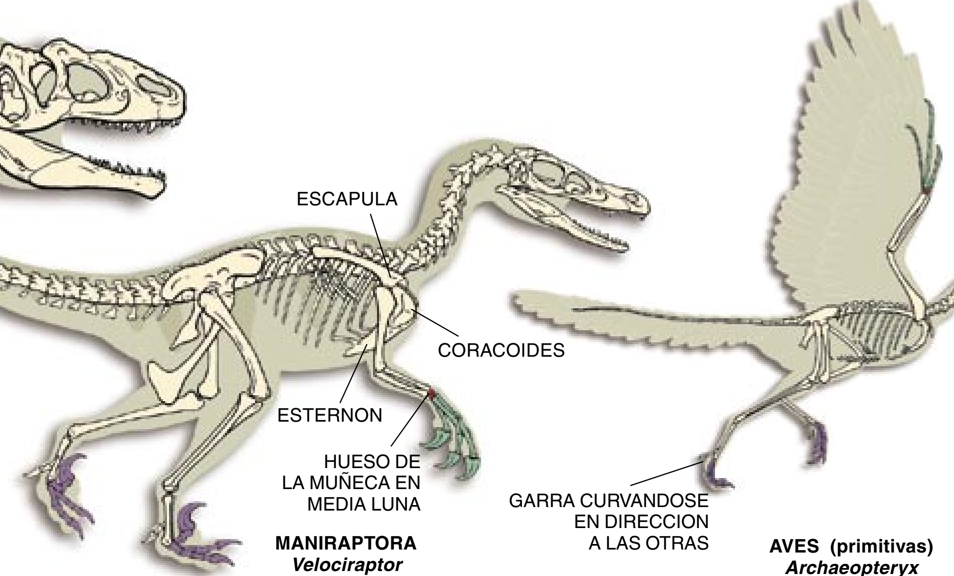


Mientras Ostrom ensartaba sus pruebas sobre el origen teropodiano de las aves, se iba fraguando un nuevo método para descifrar el parentesco entre organismos. Ocurría ello en los museos de historia natural de Nueva York, París y otras capitales. Nos referimos a la sistemática filogenética o cladismo, método que se ha convertido en el criterio estándar de biología comparada. Su aplicación ha servido para respaldar las conclusiones de Ostrom.

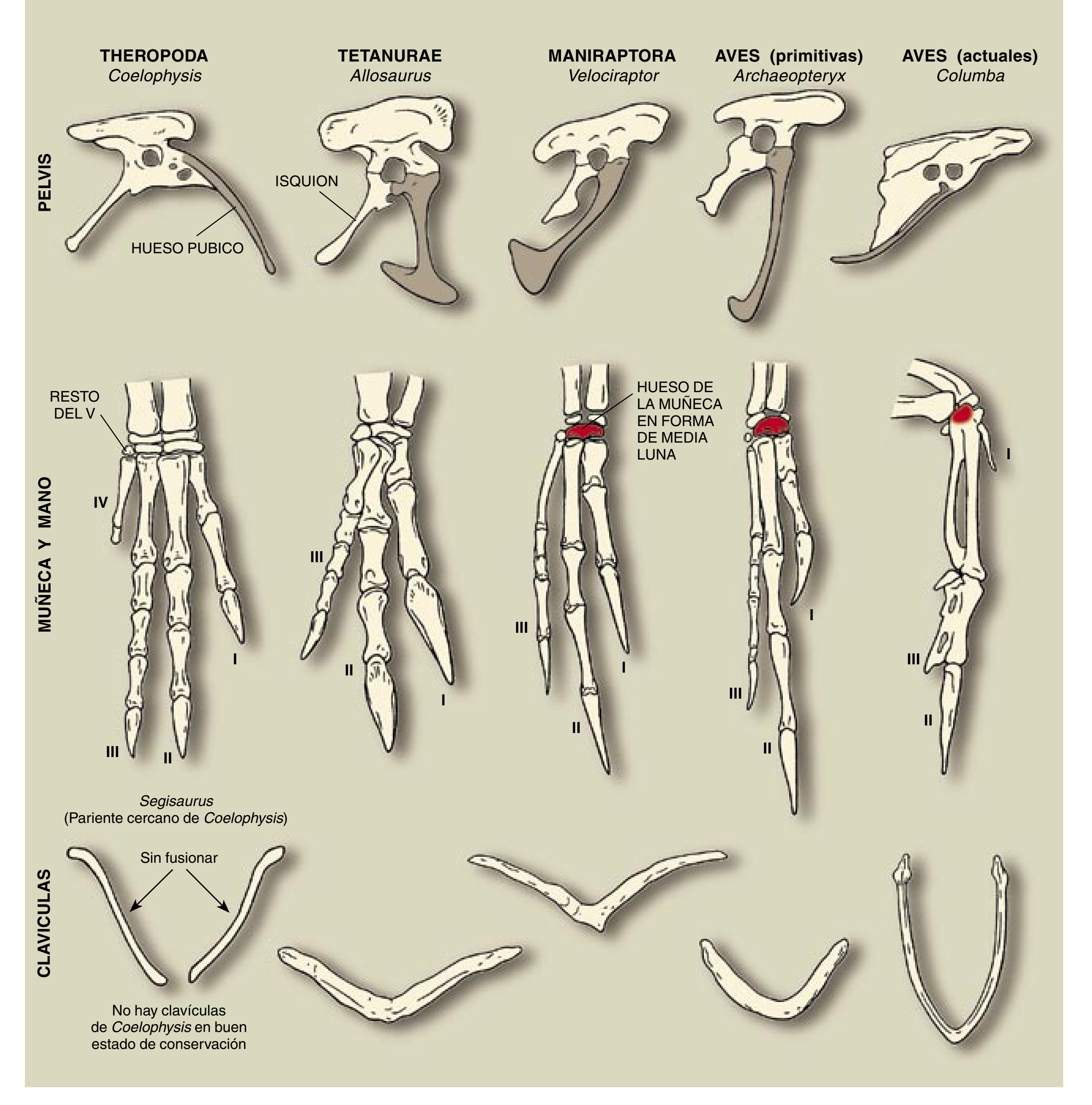
Los métodos tradicionales de agrupación de organismos se limitaban a tomar en cuenta las semejanzas y diferencias. Podían, pues, dejar fuera del grupo a una especie por la exclusiva razón de presentar ella una peculiaridad de la que carecía el resto. La cladística, por contra, agrupa los organismos fundada en ciertos tipos de caracteres compartidos y que ofrecen una información sustantiva.

El método cladista se basa en el principio darwiniano de que la evolución opera cuando aparece un nuevo carácter heredable en algún organismo, que lo transmite a sus descendientes. A tales caracteres





2. TEROPODOS REPRESENTATIVOS de la línea evolutiva que conduce hasta las Aves. Se resaltan caracteres que sirvieron para establecer el origen dinosauriano de las aves; entre otros, y en el orden de su evolución, tres dedos funcionales en el pie (*púrpura*), mano tridáctila (*verde*) y hueso de la muñeca en forma de media luna (*rojo*). *Archaeopteryx*, el ave más antigua de las que nos ha sido dado conocer, posee nuevos rasgos; así, una uña en el dedo posterior del pie que se dirige hacia los restantes dedos. En su evolución, los rasgos de las aves experimentaron modificaciones. Por mencionar algunos, se fusionaron los dedos de la mano, la cola crea el pigostilo de vértebras fusionadas, y el dedo posterior del pie sufrió un giro, permitiendo que la garra pudiera asirse a las ramas del árbol con firmeza.



3. COMPARACION DE ESTRUCTURAS ANATOMICAS. Ese cotejo ayudó a desentrañar la relación de vinculación entre aves y terópodos; puso también de manifiesto los cambios operados en algunos caracteres, su acercamiento creciente a la configuración aviana y su resolución en las aves modernas. En la pelvis (*vista lateral*) el hueso púbico (*marrón*) se orientaba en un principio hacia adelante (hacia la derecha); más tarde se verticalizó y se orientó hacia atrás. En la mano (*vista superior*) las proporciones relativas de los huesos fueron constantes en las aves primitivas, pero la muñeca cambió. En la muñeca manirraptora, el hueso discoidal se transformó en un hueso en media luna (*rojo*), lo que permitió el vuelo batido de las aves. El ancho hueso del deseo (clavículas fusionadas) en tetanuros y otros grupos posteriores se parecía al de las aves primitivas, pero se fue adelgazando y adquirió forma de U más profunda, con lo que adquirió importancia creciente para el vuelo.

novedosos la cladística los llama derivados. En esta doctrina, dos grupos de animales que comparten un conjunto de caracteres novedosos están más estrechamente emparentados entre sí que con los grupos que muestran solamente los caracteres originales, pero no los derivados. Mediante la identificación de los caracteres derivados compartidos, los cladistas pueden determinar el grado de parentesco entre los organismos estudiados.

El resultado de los análisis cladistas, que acostumbran abarcar muchos caracteres, se recoge en un cladograma: un dendrograma que muestra el orden en que evolucionaron los nuevos caracteres y los nuevos organismos. Cada punto de ramificación, o nodo, refleja la aparición del fundador de un nuevo grupo, con caracteres derivados no presentes en los grupos que le precedieron en la evolución. Este fundador y todos sus descendientes constituyen un "clado", un grupo de estrecho parentesco.

Ostrom no aplicó la metodología cladística para determinar que las aves evolucionaron a partir de pequeños dinosaurios terópodos. En los años setenta el método

empezaba a introducirse. Pero una década más tarde, Jacques A. Gauthier acometió un profundo análisis cladístico de las aves, los dinosaurios y sus parientes reptilianos. Gauthier utilizó, en su análisis cladístico, los datos de Ostrom así como otros muchos caracteres y confirmó que las aves evolucionaron a partir de pequeños dinosaurios terópodos. Entre los parientes más próximos a las aves está *Deinonychus*, el manirraptórido de garras falciformes que con tanto grafismo había descrito Ostrom.

Hoy, el cladograma que porte de los terópodos a las aves nos mostrará que el clado Aves consta de *Archaeopteryx*, como antepasado, y todos sus descendientes. Este clado es subgrupo de otro mayor, el de los terópodos manirraptóridos, subgrupo a su vez de los terópodos tetanuros que descienden de los terópodos más basales. Los terópodos ancestrales procedían, por su parte, de dinosaurios no terópodos. El cladograma reflejará que las aves no sólo *descienden* de los dinosaurios, sino que *son* dinosaurios (y reptiles), al igual que los humanos somos mamíferos, pese a que diferimos de otros mamíferos no menos que las aves de otros reptiles.

Los trabajos de Gauthier y otros posteriores demuestran que muchos caracteres que la tradición venía considerando "avianos" aparecieron en los terópodos antes del advenimiento de las aves. En buena medida, son rasgos que ayudaron a sus poseedores originarios a sobrevivir en su condición de dinosaurios terrestres; muchos de ellos se aprovecharían luego directamente, o previa transformación, para el vuelo y el modo de vida arbóreo. La obligada brevedad del artículo no nos permite catalogar las docenas de detalles que sustentan la hipótesis de que las aves evolucionaron a partir de pequeños dinosaurios terópodos; tendremos que concentrarnos en los relacionados con el origen del vuelo.

Los caracteres avianos que surgieron en los terópodos antes de que aparecieran las aves no lo hicieron todos a la vez. Algunos estaban presentes ya en dinosaurios más antiguos, anteriores a los terópodos. Así, el antepasado reptiliano inmediato de los dinosaurios era ya bípedo, erecto (esto es, caminaba básicamente como un ave), pequeño y carnívoro. Sus manos, al igual que en las primeras aves, tenían libertad para agarrar (aunque la mano tuviese cinco dedos, no los tres que poseen, si no todos, la mayoría de los terópodos basales y las aves). Además, el segundo dedo era el más largo y no el tercero como en otros reptiles.

Además, en los antepasados de los dinosaurios, la articulación del talón era ya de tipo bisagra y, elongados, los metatarsales o huesos del pie. Los metatarsales no tocaban el suelo. Ello significa, pues, que los parientes directos de los dinosaurios, y éstos mismos, caminaban sobre los dedos de los pies y ponían un pie frente a otro, con las extremidades verticalizadas. Se acepta que los cambios operados en los pies servirían, en buena medida, para incrementar la longitud de zancada y la velocidad de carrera, algo que ayudaría algún día a los terópodos avianos a volar.

Los primeros terópodos poseían huesos neumatizados y cavidades en el cráneo. Estos rasgos aligeraban el esqueleto. De largo cuello, disponían su espalda horizontalmente, a la manera que lo hacen hoy las aves. Los dedos cuarto y quinto de la mano (equivalentes al anular y meñique) estaban ya reducidos en los primeros dinosaurios. El quinto dedo, casi borrado, no tardaría en desaparecer del todo; el cuarto quedaría reducido a una protuberancia. Estos dedos reducidos faltan en los terópodos tetanuros; los tres restantes (I, II, III) se fusionarían algún tiempo después de la aparición de *Archaeopteryx*.

En los primeros terópodos, los miembros mostraban ya cierta semejanza con los característicos de las aves.

Huesos de contradicción

Son de naturaleza muy diversa las pruebas en que se basa la tesis de la evolución de las aves a partir de pequeños dinosaurios terópodos terrestres. Lo que no impide que haya voces discrepantes. Los críticos, sin embargo, no han podido defender su postura con el recurso al método cladístico o a cualquier otro de análisis objetivo del parentesco entre grupos animales. Presentamos aquí una selección de sus argumentos, con algunas pruebas que los rebaten.

Las manos de las aves difieren de las manos de los terópodos. Estos dinosaurios mantienen los dedos I, II y III (han perdido el "meñique" y el "anular"); por contra, las aves tienen los dedos II, III y IV. Esta idea sobre la mano de las aves se basa en estudios embrionarios que sugieren que, cuando existe una pérdida de dedos en una mano pentadáctila, los dedos externos (I y V) son los primeros en desaparecer. Sin embargo, nadie duda de que los terópodos conservan los dedos I, II y III, por lo que esta "ley" tiene claras excepciones y no es una regla que obligue a la retención de los tres primeros dedos. Y lo que reviste mayor importancia: el registro esquelético rechaza tales diferencias entre la mano de las aves y la de los terópodos no avianos. Los tres dedos de los terópodos no avianos, después de haber perdido el cuarto y el quinto, tienen forma semejante y las mismas proporciones y conexiones a la muñeca que se observan en *Archaeopteryx* y aves posteriores (*fila central de la figura 3*).

Los terópodos aparecieron en época muy tardía; las aves no pudieron salir de ellos. Para los partidarios de esta tesis, *Archaeopteryx* aparece en el registro fósil hace unos 150 millones de años, mientras que los manirraptores no avianos —los parientes más cercanos a las aves— serían de hace unos 115 millones de años, hipótesis que queda debilitada tras el descubrimiento reciente de huesos que pertenecen a pequeños manirraptores no avianos de la edad de *Archaeopteryx*. En cualquier caso, el hecho de no hallar fósiles de un tipo determinado no quiere decir que no se puedan encontrar en otros yacimientos.

La fúrcula de las aves (formada por la fusión de las clavículas) difiere de las clavículas de los terópodos. Esta objeción tenía interés cuando sólo se conocían clavículas en los terópodos primitivos. Pero se han descubierto ya fúrculas en bumerán, parecidas a las de *Archaeopteryx*, en muchos otros terópodos.

Los complejos pulmones de las aves no pudieron evolucionar a partir de los pulmones de los terópodos. Nos hallamos ante una sentencia que no puede ni ratificarse ni contradecirse, toda vez que el registro no conserva pulmones fósiles. Por otro lado, los defensores de esta idea no proponen ningún animal cuyos pulmones sí puedan haber producido los de las aves, que son muy complejos y distintos de los de cualquier animal actual.

—K. P. y L. M. C.



4. LOS TEROPODOS FOSILES recién descubiertos en China sugieren que las estructuras que han dado lugar a las plumas precedieron probablemente a la aparición de las aves. *Sinosauropteryx* (*izquierda*) presenta un borde filamentoso a lo largo del dorso, cuyas estructuras podrían haber sido las precursoras de las plumas. *Protarchaeopteryx* (*derecha*) muestra plumas reales, como se aprecia en la ampliación de detalle; la siguiente ampliación muestra parte de una pluma.

Extremidades largas, muslo más corto que la pierna y reducida la fíbula, el hueso que está al lado de la tibia. (En las aves actuales, el hueso en forma de palillo de dientes que hay al lado del hueso grande de la tibia es todo lo que queda de la fíbula.) Estos dinosaurios caminaban sobre los tres dedos centrales del pie, lo mismo que hacen las aves actuales. El quinto dedo, muy corto y delgado, carecía de articulación; el primero incluía un metatarsal corto (con una pequeña articulación y una uña) que se proyectaba desde el lateral del segundo dedo. El primer dedo se mantenía más alto que todos los demás y sin función aparente; andando el tiempo sería bien aprovechado por las aves. Cuando apareció *Archaeopteryx*, este dedo había sufrido una rotación hacia atrás. En las aves posteriores, descendió hasta una posición oponible para terminar formando parte importante del pie prensil.

Durante la evolución de los terópodos aparecieron muchos caracteres que se atribuían en exclusiva a las aves. Los más significativos atañían a brazos y cintura escapular. Gracias a esos reajustes, los terópodos mejoraron en su capacidad de captura de presas y, más tarde, se facilitó el vuelo. Durante la evolución de los terópodos, los brazos se fueron alargando, salvo en *Carnotaurus*, *Allosaurus* y *Tyrannosaurus*, carnívoros gigantes de miembros anteriores bastante pequeños. En los terópodos primitivos, la longitud del brazo venía a ser la mitad de la longitud de la pierna. Cuando apareció *Archaeopteryx*, el miembro anterior era más largo que el posterior y creció todavía más en las aves posteriores. Este alargamiento de los brazos en las aves permitió una batida más fuerte para el vuelo.

La mano adquirió también longitud mayor y, progresivamente, aumentó su proporción respecto a la medida del brazo; la muñeca tampoco quedó exenta de drásticos cambios morfológicos. Los terópodos basales poseían un carpal distal plano que se superponía a la base del primer y segundo huesos de la palma (metacarpales) y dedos. En manirraptores, ese hueso dibujaba, en la superficie que contactaba con los huesos del brazo, una media luna. Gracias a esa forma semilunar, la muñeca podía flexionar a un lado y otro, arriba y abajo. Podrían así doblar su larga mano, casi como lo hacen las aves actuales. Esta larga mano podría entonces rotar y lanzarse hacia adelante para agarrar la presa.

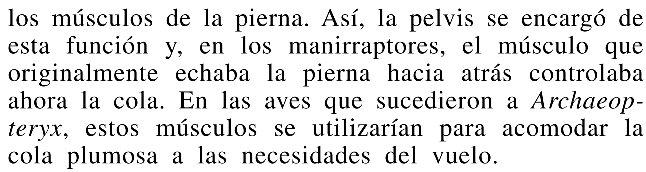
La escápula (paletilla) de la cintura escapular de los terópodos primitivos era larga y delgada, redondeado el coracoides (que junto a la escápula constituye la articulación del hombro). Dos clavículas separadas en forma de S conectaban el hombro al esternón o hueso del pecho. La escápula no tardó en hacerse más larga y delgada; el coracoides también se adelgazó y alargó, extendiéndose hacia el esternón. Las clavículas se fusionaron en su línea media y se ensancharon para formar el hueso del deseo, con figura de bumerán. El esternón, constituido en su origen por cartílago, se calcificó en los tetanuros en dos placas óseas fusionadas. Todos estos cambios fortalecieron el esqueleto. Más tarde, este fortalecimiento fue aprovechado para reforzar el aparato y los músculos del vuelo. El nuevo hueso del deseo, por ejemplo, se convirtió probablemente en sólido punto de anclaje de los músculos que movían los brazos, primero para ramonear y luego durante el vuelo.

Se fueron agregando más vértebras a la cintura pelviana. El hueso púbico (el hueso pélvico situado hacia adelante y hacia abajo del acetábulo) cambió su orientación. En los primeros terópodos, como en la mayoría de los reptiles, el pubis apuntaba hacia abajo y hacia adelante, pero entonces sufrió un giro hacia atrás. Por último, en aves más avanzadas que *Archaeopteryx* se orientaría paralelo al isquión, el hueso pélvico que se extiende hacia atrás desde la parte inferior del acetábulo. Las ventajas derivadas de estos cambios, si alguna, las desconocemos, pero el hecho de que estos caracteres sean compartidos por aves y otros manirraptores muestra su origen común.

Finalmente, durante la historia de los terópodos, la cola se fue acortando de manera gradual. Ganó rigidez y desempeñó un papel estabilizador en la carrera, según lo observamos hoy en el correcaminos. Steven M. Gatesy ha demostrado que esta transición en la estructura caudal lleva aparejada otro cambio en la función: la cola fue cada vez menos significativa para

KEVIN PADIAN y LUIS M. CHIAPPE colaboran a menudo en proyectos de investigación. Padian es profesor de biología general y conservador del Museo de Paleontología de la Universidad de California en Berkeley. Chiappe, que ha estudiado la radiación de las aves durante el período Cretácico, está adscrito al Museo Americano de Historia Natural de Nueva York, en cuya universidad metropolitana enseña.









los músculos de la pierna. Así, la pelvis se encargó de esta función y, en los manirraptores, el músculo que originalmente echaba la pierna hacia atrás controlaba ahora la cola. En las aves que sucedieron a *Archaeopteryx*, estos músculos se utilizarían para acomodar la cola plumosa a las necesidades del vuelo.

Muchos caracteres esqueléticos que antaño se suponían innovaciones exclusivas de las aves —huesos huecos y ligeros, brazos largos, manos con tres dedos siendo el tercero muy elongado, fúrcula, pelvis dirigida hacia atrás, largas piernas con pies tridáctilos— las poseían ya los terópodos. Estos caracteres cumplieron una misión distinta de la que desarrollarían en las aves: se les acomodaría a las necesidades del vuelo y otras funciones típicamente avianas, incluido un modo de vida arborícola.

Las pruebas que avalan el origen teropodiano de las aves no se limitan al esqueleto. Los recientes descubrimientos de nidos, en Mongolia y Montana, revelan que ciertos comportamientos de las aves ligados a la reproducción se habían originado ya en los terópodos. Estos dinosaurios no ponían muchos huevos a la vez, como hacen los reptiles, sino que, a la manera de las aves, iban llenando poco a poco el nido, huevo a huevo (o un par) en el decurso de varios días. Se han encontrado recientemente esqueletos del terópodo cretácico *Oviraptor* cubriendo el nido; los dinosaurios quedaron enterrados mientras protegían los huevos en una pauta de conducta típicamente aviana. Lo que no deja de resultar un tanto paradójico, si consideramos que la palabra *Oviraptor* significa "ladrón de huevos", en alusión a la depredación que se le venía atribuyendo. La propia cáscara de los huevos de terópodos muestra caracteres que se observan sólo en los huevos de las aves; consta, en efecto, de dos capas de calcita, una prismática (cristalina) y otra esponjosa (más irregular y porosa).

Si tuviésemos que mencionar un carácter definidor de los pájaros que falta en los dinosaurios no avianos, citaríamos las plumas sin pensarlo. Pero también hay indicios de que las plumas podrían haber precedido a la aparición de las aves.

En 1996 y 1997 Ji Qiang y Ji Shu'an dieron a conocer el hallazgo de dos animales fósiles en la provincia de Liaoning; pertenecían al Jurásico superior o Cretácico inferior. Uno de los dinosaurios, del tamaño de un pavo, ha recibido el patronímico de *Sinosauropteryx*; presenta estructuras filamentosas a lo largo del dorso y en la superficie corporal. Estas estructuras de la piel, o tegumento, pueden haber sido precursoras de las plumas. El animal, con todo, dista de ser un ave. Sus brazos cortos y otros caracteres esqueléticos denuncian un posible parentesco con *Compsognathus*, terópodo alejado de las aves y de otros manirraptores.

El segundo ejemplar, *Protarchaeopteryx*, diríase dotado de plumas genuinas, cortas en el tronco y más largas en la cola. Las primeras observaciones sugieren que este animal es un terópodo manirraptórido. Habrá que ahondar más en su anatomía para decidir si se trata o no de un ave. En cualquier caso, los hallazgos chinos indican que al menos las estructuras que originaron las plumas aparecieron probablemente antes que las aves y con certeza antes de que éstas echaran el vuelo. No sabemos si su función inicial tenía que ver con la insolación, la exhibición u otra desconocida.

El origen de las aves y el origen del vuelo, aunque relacionados, son dos problemas distintos. Las plumas cumplían ya otras funciones antes de que se desarrollase el vuelo. Tampoco *Archaeopteryx* fue quizás el primer terópodo volador, aunque no se conozcan fósiles de voladores anteriores. ¿Qué podemos decir sobre el comienzo del vuelo en los antecesores de las aves?

Se han venido sugiriendo dos hipótesis contrapuestas. De acuerdo con la explicación "arborícola", los antecesores de las aves se subían a los árboles y se lanzaban desde las ramas con la ayuda de las incipientes plumas. La altura de los árboles proporciona una plataforma suficiente para el lanzamiento, en especial para un cierto planeo. Puesto que las plumas adquirieron con el tiempo mayores dimensiones, aumentó la capacidad de aleteo hasta que terminaron por alcanzar la autonomía aérea.

Esta hipótesis, muy verosímil en su desarrollo, presenta varios problemas. Ni en *Archaeopteryx* ni en sus parientes manirraptóridos se observan adaptaciones arborícolas claras; por ejemplo, pies plenamente adaptados a la actividad prensil. Quizás algunos de ellos podrían trepar a los árboles, pero ningún análisis ha demostrado que *Archaeopteryx* hubiera trepado ni tratado de volar con sus brazos. Añádase que en los ambientes donde se han hallado fósiles de este animal no había plantas que se elevaran más allá de pocos metros. Y aun cuando pudieran trepar a los árboles, no hemos de confundir semejante habilidad con los hábitos arborícolas

o la capacidad de planeo. La mayoría de los animales pequeños, incluso cabras y canguros, pueden trepar a los árboles, sin por ello ser arborícolas. Por otro lado, *Archaeopteryx* carece de una amplia membrana que conecte los brazos y las extremidades posteriores, entre otros rasgos típicos de planeador.

La hipótesis "corredora" sostiene que los dinosaurios pequeños corrían por el suelo y extendían sus brazos para mantener el equilibrio mientras cazaban insectos o huían de sus depredadores. La presencia de plumas rudimentarias podría haber expandido la superficie del brazo y haber mejorado la capacidad de sostenerse en el aire. Las plumas de mayor talla habrían reforzado esta capacidad, hasta la adquisición gradual del vuelo sostenido. Por supuesto, un salto en el aire no produce la misma aceleración que el lanzamiento desde un árbol; el animal tiene que correr muy rápido para despegar. Algunos animales pequeños pueden, sin embargo, conseguir altas velocidades.

La hipótesis corredora está respaldada por el hábito terrestre de los terópodos que fueron antecesores inmediatos de las aves. Presentaban los caracteres necesarios para altas velocidades: eran pequeños, activos, ágiles, ligeros, de largas piernas y buenos corredores. En cuanto bípedos, sus brazos quedaban libres para el desarrollo de la capacidad de aleteo, algo que no podemos decir de otros reptiles de su tiempo.

Pese a la escasez de pruebas disponibles, ni la hipótesis arborícola ni la corredora explican por sí mismas todos los problemas. Resulta más probable que los antecesores de las aves utilizaran una combinación de ambas, despegando desde el suelo o aprovechando la ventaja desde alturas accesibles (promontorios, rocas o árboles caídos). Quizá no treparan a los árboles, pero podrían haber utilizado cualquier objeto disponible del paisaje para soltarse a volar.

Más importante que la polarización suelo o árboles es la evolución del mecanismo de la batida para el vuelo. Esta batida no solamente permite la sustentación del individuo al mover las alas en el aire (como una hoja), sino también el empuje hacia adelante resultante de este aleteo. (Por contra, los órganos que sustentan e impulsan a los aviones —las alas y los motores— están separados.) En aves y murciélagos, la parte del ala que corresponde a la mano proporciona el empuje; el resto de la misma aporta la sustentación.

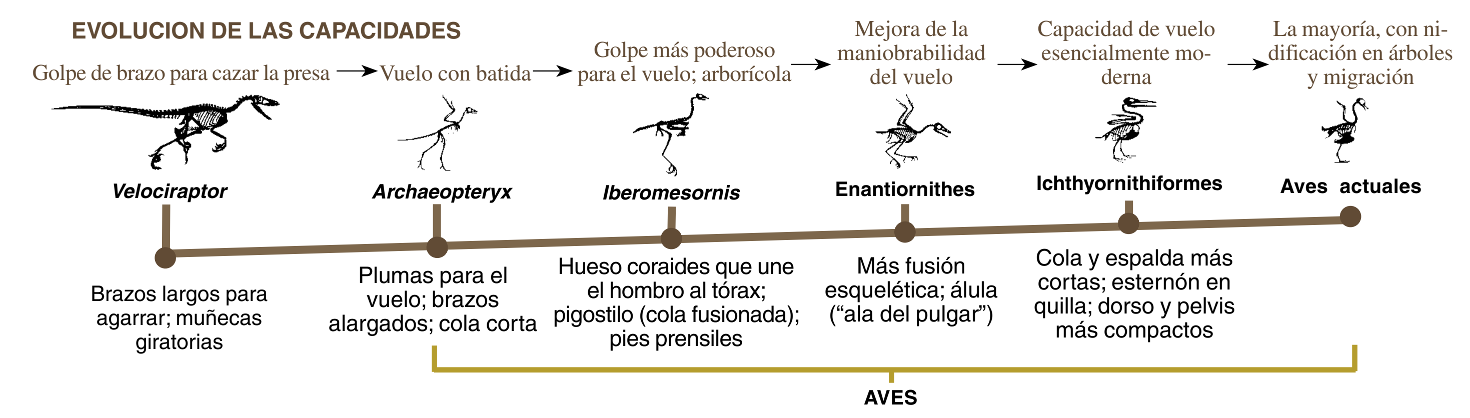
Jeremy M. V. Rayner demostró a finales de los años setenta que la batida arriba y abajo de las alas de aves y murciélagos producía una serie de torbellinos que empujaban al animal volador hacia adelante. Padian y Gauthier demostraron a mediados de los ochenta que el movimiento que producen estos torbellinos en las aves era el mismo —flexión hacia los lados de la mano— que se advertía en los manirraptóridos *Deinonychus* y *Velociraptor* y también en *Archaeopteryx*.

Según hemos dejado dicho, los primeros manirraptóridos debieron de utilizar este movimiento para cazar una presa. Cuando aparecieron *Archaeopteryx* y otras aves la cintura escapular había cambiado su orientación hacia un lado, en vez de hacia abajo y atrás. Esta diferente orientación transformó el movimiento del miembro anterior: dejaba de servir para la caza y se adaptaba a la batida para el vuelo. Nuevas pruebas procedentes de Argentina sugieren que la cintura escapular en los manirraptóridos más cercanos a las aves (el nuevo dinosaurio *Unenlagia*) presentaba ya la orientación lateral, con los cual podría realizar este tipo de batida.

Gracias a los trabajos de Farish A. Jenkins Jr., George E. Goslow y sus colaboradores disponemos de abundante información sobre el papel de la fúrcula o hueso del deseo durante el vuelo; han arrojado asimismo mucha luz sobre la adquisición del mecanismo de batida. La fúrcula de algunas aves modernas actúa de amortiguador entre los hombros, almacenando energía producida por el aleteo durante el vuelo. Era, por contra, menos elástica en las primeras aves; debió de desempeñar entonces la función principal de anclaje para los músculos de los miembros anteriores. Todo indica que el músculo responsable de la agitación y elevación del ala durante la batida de recuperación no estaba, ni en *Archaeopteryx* ni en otras aves primitivas, en la posición que ocupa ahora. De donde se desprende que no serían expertas voladoras; se mostrarían incapaces de aletear con la celeridad y precisión de las aves actuales. Pero no pasaría mucho tiempo —sólo unos



5. *OVIRAPTOR* fue un terópodo manirraptórido anterior a las aves. Se aposentaba en el nido para proteger los huevos (*izquierda*), igual que hacen hoy el avestruz (*derecha*) y otras aves. Es decir, observamos un comportamiento originado antes de la aparición de las aves. En el fósil que sirvió como base para el dibujo de *Oviraptor* (*fotografía, arriba*) la posición de las garras revela que los miembros rodeaban los huevos (*grandes óvalos*) para protegerlos.



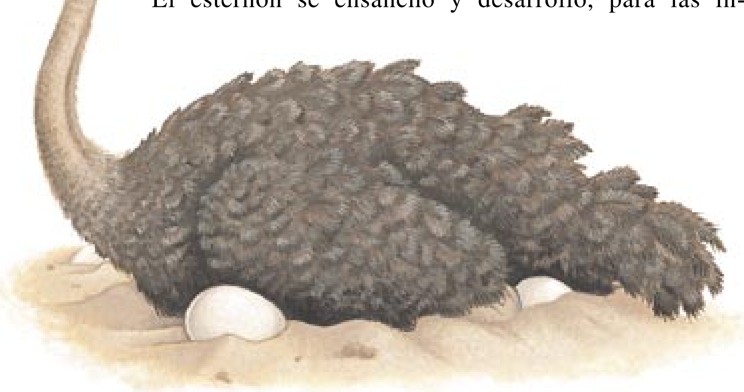
6. CLADOGRAMA de la evolución de las aves. La interpretación del mismo nos enseña que éstas perfeccionaron gradualmente su batida para el vuelo desde que aparecieron, hace unos 150 millones de años. Sin embargo, muy pronto se hicieron arborícolas. Se señalan algunas de las innovaciones en el esqueleto con las que reforzaron su adaptación.

millones de años, quizá— para que las aves desarrollasen el aparato necesario para controlar el vuelo.

Desde 1990 se han desenterrado tres veces más fósiles de aves del Cretácico que en toda la historia del registro. Con la investigación de estos nuevos especímenes —de España, China, Mongolia, Madagascar y Argentina— empiezan a aclararse los primeros pasos de la evolución de las aves que siguieron a *Archaeopteryx*, incluida la adquisición de un sistema más seguro de vuelo. Los análisis llevados a cabo en estos hallazgos por Chiappe y otros investigadores han demostrado que las aves no tardaron en multiplicar tamaños, formas y conductas (desde buceadoras a no voladoras), diversificándose a lo largo del período Cretácico, que se cerró hace unos 65 millones de años.

Un ornitólogo de campo que se adentrara en un bosque del Cretácico inferior no asociaría lo observado con lo que pudiera hallar hoy. Aquellas protoaves pasarían mucho tiempo en los árboles y tendrían capacidad prensil, pero no hay datos de que nidificaran en los árboles, produjesen cantos refinados o emigraran a través de largas distancias. Tampoco sabemos si empezarían a volar sólo cuando adquiriesen casi el tamaño adulto, como hoy, y si, como hoy también, crecían muy deprisa. Sólo nos cabe imaginar su aspecto; sin duda, serían muy extraños, con garras en los dedos de las manos y, en muchos casos, con picos dentados.

Por debajo de la piel, algunos caracteres esqueléticos se fueron configurando de forma más aviana durante el Cretácico inferior, lo que posibilitaría el vuelo perfecto de estas aves volar muy bien. Se fusionaron muchos huesos de la mano y de la pelvis, aumentando la fortaleza del esqueleto para el vuelo. El esternón se ensanchó y desarrolló, para las inserciones musculares, una quilla en la línea media del tórax. El brazo se alargó y los huesos del cráneo y las vértebras se aligeraron, ahuecándose. Los huesos de la cola devinieron una serie corta de segmentos exentos que remataban en el pigostilo (u "obispillo"), que controlaba las plumas caudales. Y emergió el álula o "ala del pulgar", una parte del ala esencial para controlar el vuelo a baja velocidad; apareció también un primer dedo del pie muy largo, con capacidad prensil.



En la medida en que las aves primitivas pudieran volar, tendrían tasas metabólicas superiores a las de otros reptiles de sangre fría; debieron de poder generar, al menos, el calor y la energía suficientes para volar sin depender de la temperatura externa. Pero no conocerían el régimen de sangre caliente tan desarrollado de las actuales. Sus plumas, además de para volar, servirían para mantener el calor de la insolación, igual que los precursores de las plumas podrían haber ayudado a preservar el calor y conservar la energía en los antecesores de las aves. Comparadas con las especies vivas, ésas no volarían a buen seguro ni tan lejos ni tan raudas.

Los ornitólogos que recorriesen un bosque unos 50 millones de años después encontrarían todavía representantes de linajes primitivos de aves. Pero distinguirían con nitidez los primeros engendradores de los grupos actuales. Trabajos recientes han demostrado que ya antes del final del período Cretácico habrían florecido al menos cuatro grandes líneas de aves actuales, incluidos parientes de aves acuáticas, marinas, colimbos, patos y gansos. Contamos, además, con pruebas paleontológicas y moleculares de la presencia entonces de los precursores de otras aves.

La mayoría de los grupos de aves que evolucionaron durante el Cretácico desaparecieron en ese mismo intervalo, aunque no hay datos de que fuese de forma repentina.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE FIRST 85 MILLION YEARS OF AVIAN EVOLUTION. Luis M. Chiappe en *Nature*, vol. 378, páginas 349-355; 23 de noviembre, 1995.

THE ENCYCLOPEDIA OF DINOSAURS (véanse las entradas "Aves" y "Bird Origins"). Coordinada por Philip J. Currie y Kevin Padian. Academic Press, 1997.

THE ORIGIN AND EARLY EVOLUTION OF BIRDS. Kevin Padian y Luis M. Chiappe. Chiappe en *Biological Reviews* (en prensa).

Ciencia y espionaje

Jeffrey T. Richelson



Cincuenta años duró la guerra fría. En el transcurso de la misma, los EE.UU. invirtieron cientos de miles de millones de dólares en proyectar, construir y poner en funcionamiento un imponente arsenal de sistemas avanzados para recoger información y cartografiar características del relieve útiles desde el punto de vista militar. Decenas de satélites de reconocimiento tomaban desde el espacio millones de imágenes de la superficie terrestre, mientras los sensores infrarrojos de otros satélites detectaban lanzamientos de misiles, explosiones y otros fenómenos de consumo o liberación de energía. En el cielo, aviones diseñados al efecto sacaban fotos de reconocimiento y realizaban mediciones meteorológicas. Bajo el mar, dispositivos de sonar seguían el andar de los submarinos; desde la superficie, los barcos cartografiaban el fondo submarino con inusitada precisión.

Los incontables millones de imágenes y trillones de bytes de datos recogidos a través de semejante despliegue global descansan ahora en centros de datos, áreas de computación, archivos, fototecas y demás instalaciones dispersas por los aledaños de Washington, D.C. Y, a pesar de que algunos datos retienen valor militar o para el servicio secreto, el paso del tiempo y el hundimiento de la Unión Soviética han mermado de manera drástica la importancia de la mayoría.

De unos años a esta parte, sin embargo, ha comenzado a adquirir peso una idea inédita, que otorga un interés añadido a esa ingente copia de datos que tan alto coste supuso. Mucha de esta información recogida con fines militares y de los servicios de inteligencia constituye una mina para la ciencia, que podría beneficiarse sin comprometer ninguno de los imperativos —como el secreto— en virtud de los cuales se compiló y utilizó.

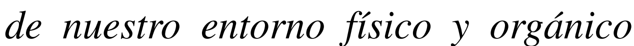
La idea ha cristalizado en la formación de un grupo nutrido de científicos con credenciales de alta seguridad que han estudiado minuciosamente ristras de datos, rollos de imágenes y cintas innúmeras de grabaciones de los archivos del servicio secreto. Se ha instruido a los integrantes de Medea —así se ha bautizado al grupo de expertos— sobre los sensores y las plataformas más avanzados. Se les ha solicitado incluso que aconsejen a los miembros del servicio de inteligencia sobre el diseño de nuevas plataformas y el funcionamiento de las existentes, para mejor acomodarse a los fines de la ciencia.

Puesto que lleva muy pocos años en funcionamiento esa colaboración, resulta prematuro declararla un éxito o un fracaso. Pero su mera supervivencia a lo largo de ese tiempo constituye ya un mérito. Era la primera vez que el servicio de inteligencia trabajaba codo con codo con científicos ajenos al Gobierno, con la categoría, confianza e intimidad que se exige a quienes habrán de hacer un uso exhaustivo de datos reservados. Una cooperación, por otro lado difícil, que requerirá una adaptación mutua entre dos mentalidades, la de los científicos y las de los espías, cuyos métodos de manejar la información son antagónicos. En el ámbito de la ciencia, la libre divulgación de datos es condición necesaria para el progreso; en el servicio secreto, por contra, la restricción de la información es un imperativo: sólo quien está habilitado para ello o quien, para cumplir la responsabilidad asignada, precisa determinados conocimientos tienen acceso a la información.

Medea ha empezado por determinar si los datos y materiales a su

JEFFREY T. RICHELSON es un alto funcionario del Archivo de Seguridad Nacional en Washington, D.C. Ha escrito varios libros sobre el papel desempeñado por la ciencia y la técnica en el espionaje de nuestro siglo. En 1975 se doctoró en ciencias políticas por la Universidad de Rochester. Los puntos de vista aquí expresados no coinciden necesariamente con los del organismo oficial para el que trabaja.

En una colaboración sin precedentes, científicos y funcionarios del servicio secreto norteamericano trabajan juntos para aprovechar la inmensa documentación reservada en el estudio de nuestro entorno físico y orgánico





alcance pueden servir a los expertos en el estudio de las tendencias en calentamiento global, temperatura del océano, manto vegetal y forestal, desertización, condiciones de los casquetes polares y demás asuntos de parejo interés geofísico y ecológico. Se han publicado ya dos artículos en revistas especializadas que se basaban en datos procedentes del servicio de inteligencia; se trata de unas primeras muestras de lo que puede conseguirse en una investigación científica, no sujeta a reserva alguna, fundada, sin embargo, en datos censurados. Es más, instados en buena medida por el ejemplo de Medea, los responsables del servicio secreto manifiestan una proclividad creciente a colaborar con expertos de fuera, lo que ha reportado beneficios inesperados. Tales ventajas se hacen palmarias en el campo de la respuesta ante casos de emergencia; en ese dominio, las imágenes de satélite de reconocimiento clasificadas resultaron de un valor impagable para los equipos que tuvieron que hacer frente a la catastrófica erupción volcánica en la isla caribe de Montserrat y a los incendios forestales en Alaska.

A la mayoría de los datos y documentos no se les ha levantado todavía el secreto. No es fácil, pues, hacer una valoración concluyente de su interés para las diversas disciplinas que tienen que ver con el entorno. Pero van saliendo a la luz, con carácter oficial o filtrados, numerosos detalles relacionados con las características y posibilidades de las plataformas secretas y los sensores de recogida de datos, así como con los períodos de operación.

Los satélites de reconocimiento fotográfico lanzados durante los últimos 37 años, cada uno de los cuales alcanzaba en su día los límites de la más avanzada técnica aerospacial y óptica, están entre los instrumentos vinculados con el servicio secreto y desplegados en la guerra fría mejor conocidos. La hornada más reciente correspondería a dos prototipos de la serie Keyhole (“ojo de cerradura”), el KH-11 y el KH-11 Avanzado, satélites capacitados para enviar imágenes de forma casi instantánea a través de otro satélite retransmisor. Nueve satélites KH-11 entraron en órbita entre 1976 y 1988; en los años noventa se lanzaron tres KH-11 Avanzado, que costaron unos 1500 millones de dólares y que siguen operando todavía, reemitiendo imágenes con una definición de 15 cm o mejor.

Se espera que el gobierno estadounidense proceda a una inminente desclasificación de los sistemas de satélites de alta definición que operaron de 1963 a 1984 (conocidos como KH-7 y KH-8), el KH-9 (sonda de reconocimiento de formación de imágenes de campo ancho) y los KH-11 y KH-11 Avanzado. La censura no ha impedido, sin embargo, que se haya filtrado a la prensa especializada bastante información, imágenes incluidas. Otros boquetes por donde saltó información relativa a los satélites se abrieron a raíz de los procesamientos de William Kampiles, que había trabajado para la CIA, y del analista de espionaje de la inteligencia naval Samuel Loring Morison. Ambos fueron condenados por hacer revelaciones no autorizadas sobre el KH-11.

Los prototipos Keyhole precedentes a los mencionados, del KH-1 al KH-9 (el programa del KH-10 quedó cancelado antes de lanzar ningún prototipo), regresaron con las alforjas repletas de grabaciones de blancos potenciales en la Unión Soviética, China, Cuba, Oriente Medio y otras partes. Entre 1960 y 1972 se programaron 144 lanzamientos para los satélites KH-1 a KH-9, pero no to-

1. EL ENCUENTRO ENTRE DOS MUNDOS —ciencia y servicio secreto— plantea problemas en la divulgación de la información, pero podría aportar grandes beneficios para el estudio multidisciplinar de la Tierra.

Sistemas de inteligencia escogidos y sus aplicaciones científicas

	NOMBRE DE LA PLATAFORMA	AÑOS EN SERVICIO	SENSORES/CARACTERISTICAS ESPECIALES	APLICACIONES MILITARES	APLICACIONES CIENTIFICAS
SATELITES	KH-1 – KH-6 KH-7 y KH-8	1960–1972 1963–1984	Grababa imágenes en película fotográfica	Reconocimiento	Estudios sobre expansión, disminución o integridad de suelo cultivable y de los bosques, desiertos y demás ecosistemas; inspección de la erosión costera, de los incendios forestales y de la actividad volcánica
	KH-9	1971–1984	Objetivo de gran angular para tomar imágenes que abarcaran miles de kilómetros cuadrados		
	KH-11 KH-11 Avanzado	1976-1995 desde 1992 hasta hoy	Enviaba imágenes a la Tierra en tiempo real		
	DSP	desde 1970 hasta hoy	Infrarrojos	Detecta lanzamientos de misiles, explosiones y fuego	Detecta la irrupción de meteoritos en la atmósfera terrestre
	Lacrosse	desde 1988 hasta hoy	Genera imágenes de radar en cualquier condición atmosférica y en cualquier momento	Reconocimiento	Inspección del hielo y de la nieve; localización y evolución de los niveles de lagos, corrientes y manantiales
AVIACION	U-2	desde 1956 hasta hoy	Ahora registra imágenes electroópticas en tiempo real	Reconocimiento	Estudios sobre la expansión, disminución o integridad de suelo cultivable y bosques, desiertos y otros ecosistemas; control de la erosión y de los desastres naturales
	SR-71	1964–1990	Era capaz de fotografiar más de 260.000 km^2 en una hora		
BUQUES	Buques de inspección (los TAGS-60 pertenecen a la última generación)	desde 1950 hasta hoy	Sistema cartográfico de contornos, de haces múltiples; sistema de profundidad de haz ancho; sonda del subsuelo	Datos sobre campos gravitatorios y magnéticos marinos; propiedades de sedimentación del fondo marino y su batimetría; perfiles verticales de salinidad y temperatura	Datos de referencia para futuros estudios marinos; calibración de los algoritmos de los satélites; mejoras en selección de muestras de salinidad y temperatura
DISPOSITIVOS DE SONAR	SOSUS	Desde mediados de 1950 hasta hoy	Hidrófonos	Identificación y seguimiento de submarinos enemigos	Medición de la temperatura oceánica; seguimiento de la población de ballenas y sus movimientos

dos cosecharon el mismo éxito. Los satélites registraron más de 800.000 imágenes de reciente desclasificación, levantamiento que, dicho sea de paso, fue reclamado por Medea (*véase* "Arte y ciencia del reconocimiento fotográfico", por Dino A. Brugioni; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1996). Las cámaras de los satélites KH-1 permitían una definición de objetos en torno a los 12 metros; esta resolución se mejoró en los KH-4 hasta situarla en 1,5 metros.

Los satélites de resolución superior, más avanzados, los KH-7, KH-8 y KH-9, proporcionaron millones de imágenes en los años setenta y principios de los ochenta. KH-9, modelo único, estaba dotado para recoger imágenes de decenas de miles de kilómetros cuadrados en un solo fotograma con una definición de 2/3 de metro. En 1984 concluyeron los programas relativos a los KH-8 y KH-9.

Del Programa de Apoyo a la Defensa (DSP), auspiciado por el Ejército del Aire, ha derivado otro grupo de satélites de manifiesto interés científico; se caracterizan por incorporar sensores de infrarrojos. El primer modelo se lanzó en 1970 y el decimoctavo en febrero de 1997. Operan en órbitas geosincrónicas a 35.900 kilómetros sobre la Tierra; los principales sensores a bordo de los DSP son de infrarrojos, diseñados especialmente para detectar la estela de los misiles balísticos intercontinentales o lanzados desde submarinos rusos o chinos. Estos satélites portan, además, diversos sensores de objetivo específico para detectar los rastros de las explosiones nucleares en la atmósfera. A lo largo del tiempo los sensores de infrarrojos incluidos en el DSP han detectado lanzamientos de misiles de alcance intermedio (los SCUD, entre ellos), cohetes, sondas en órbita baja y explosiones a gran escala.

En el archivo de imágenes abunda la documentación generada por Lacrosse. Los satélites involucrados en ese programa no extraen fotografías, sino que transmiten ondas de radio. Los sensores a bordo del satélite reciben las ondas reflejadas, que entonces se transforman en una imagen del blanco. Puesto que las ondas de radio atraviesan el manto de nubes y no sufren ninguna alteración por la oscuridad, el programa Lacrosse suministra a los EE.UU. un abastecimiento continuo de datos para construir imágenes.

Salvo los satélites DSP, bajo el mando del Ejército del Aire, los demás que acabamos de mencionar fueron proyectados por la norteamericana Oficina de Reconocimiento Nacional (NRO), que se encargó también de su operación. La NRO, antaño secreta, se estableció el 6 de septiembre de 1961 para coordinar el trabajo de la CIA y las Fuerzas Aéreas en el reconocimiento desde el espacio. La oficina llegó a ser tan secreta, que su nombre o acrónimo sólo podía citarse en documentos reputados de máxima reserva. El Departamento de

Defensa no admitió públicamente la existencia de la NRO hasta 1992.

Las imágenes de reconocimiento fotográfico almacenadas en los archivos no provienen sólo de los satélites, sino también de los vuelos de aviones. El avión de reconocimiento estadounidense más conocido es el U-2; su misión espía quedó a la intemperie a raíz del derribo, en 1960, de Francis Gary Powers, piloto de la CIA, en territorio soviético. El incidente acabó con los vuelos sobre la Unión Soviética, pero durante más de 40 años los U-2 sobrevolaron y fotografiaron objetivos militares del globo entero. Actualmente se utilizan para controlar el cumplimiento de los acuerdos de Irak, según los términos del alto el fuego recogidos en la guerra del golfo Pérsico de 1991.

Otro avión de reconocimiento, el SR-71 de las Fuerzas Aéreas, operaba desde finales de los sesenta hasta que se retiró provisionalmente en 1990. (Dos aviones se reincorporaron luego al servicio, pero todo apunta a que volverán a los hangares.) A una altura que superaba los 26.000 metros y a velocidades superiores a Mach-3, los SR-71 fotografiaban más de 260.000 kilómetros cuadrados en una sola hora. El resultado son millones de kilómetros cuadrados registrados en las fotografías realizadas por los SR-71 en sus misiones.

Durante la guerra fría, mientras la CIA, la NRO y la aviación fotografiaban por igual territorio enemigo y aliado, la Armada tejía una red mundial de dispositivos sonar para no perder la pista de las posiciones y los movimientos de los submarinos soviéticos. La información era vital en el juego del ratón y el gato que mantenían los submarinos entre sí, cuyos misiles balísticos se esforzaban por eludir el ataque enemigo que intentaría destrozarlos inmediatamente en una guerra nuclear.

Estas formaciones de dispositivos sonar constituían el Sistema de Vigilancia Acústica, o SOSUS. Durante gran parte de la guerra fría, se fueron implantando por varios puntos del fondo marino unos 20 dispositivos de hidrófonos SOSUS, capacitados para detectar señales acústicas generadas por los submarinos soviéticos. Los aparatos poseen suficiente sensibilidad para permitir que los expertos identifiquen no sólo la clase, sino también el submarino específico. Es más, los SOSUS pueden controlar los movimientos de los barcos que navegan por la superficie del océano e incluso los de los aviones que vuelan rozándola.

Los trabajos de desarrollo sobre los SOSUS se iniciaron en 1950 y condujeron, cuatro años más tarde, a la instalación del primer despliegue de hidrófonos sobre la plataforma continental junto a la costa este de los EE.UU. Los dispositivos se actualizan periódicamente. Se fabrica ya la quinta o sexta generación de prototipos.

De cada submarino se registran su eco en el sonar y los ruidos que emiten sus motores, sistema de refrigeración y movimiento de sus hélices. Los sonidos se traducen a una sola señal de reconocimiento que permite a los expertos no sólo determinar el tipo —digamos un submarino de combate de clase Alfa o un submarino de lanzamiento de misiles de la clase Typhoon—, sino también identificar la unidad en concreto.

Este conjunto global de sensores en el mar, aire y espacio cumple sin problemas las misiones de inteligencia y militares que se les han asignado. Pero faltaba por ver si sus datos, pasados y presentes, revestían interés científico. El largo y burocrático proceso para despejar esa incógnita empezó en mayo de 1990, cuando el entonces senador por Tennessee Al Gore envió un escrito a un mando de la CIA. Le mostraba en él su deseo de saber si la agencia poseía bases de datos sobre los océanos, nubes, vientos tropicales y lluvias que pudieran encerrar valor desde cualquier enfoque para la ciencia y, en particular, la ecología.

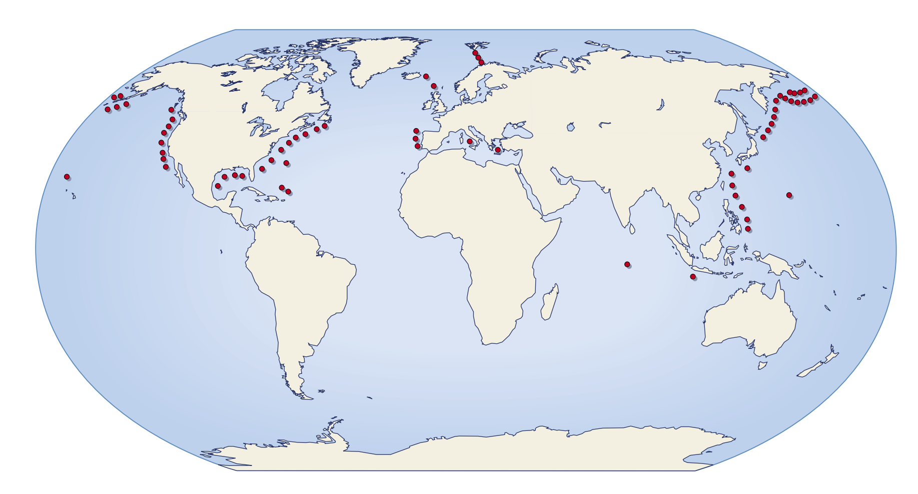
Resultó que, efectivamente, la agencia guardaba datos substanciales sobre muchos de los temas solicitados en la carta. Algo después, la jefatura de la CIA organizó un encuentro con un grupo de científicos ajenos al servicio de inteligencia. Asistieron, entre otros, Jeffrey Dozier, decano de ciencias del medio ambiente de la Universidad de California en Santa Bárbara, y Gordon J. MacDonald, geofísico de la Universidad de California en San Diego.

En la primavera de 1992 Robert Gates, director entonces de la CIA, concedió acreditaciones de seguridad a un grupo de expertos, a sugerencia tal vez del propio Gore. Las habilitaciones les facultaban para estudiar los informes reservados desde la óptica de su potencial interés científico. Se reclutaron 70 expertos, divididos en once equipos de disciplinas medioambientales. Los elegidos procedían del mundo académico, del sector privado y de entidades gubernamentales, como la Agencia de Protección del Medio Ambiente y la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera. La primera reunión oficial se celebró en octubre de 1992. En ella se abordó un elenco de necesidades en punto a datos medioambientales y sus posibles fuentes de obtención.

Los expertos seleccionados consultaron con otros colegas ajenos al programa para confeccionar una lista de cuestiones primordiales y una relación de materiales requeridos para empezar a resolverlas. En ese contexto, uno de los grupos de estudio, dedicado a los gases implicados en el efecto invernadero, destacó el interés del ozono. Para establecer mejor la correlación entre la abundancia de esta molécula con las observaciones climáticas, se acordó que urgía determinar la distribución vertical del ozono en función de la estación y la latitud con la suficiente precisión como para detectar una variación del 5% en 10 años.

Una vez establecida la lista de prioridades, los servicios de inteligencia —en particular la CIA y la NRO—, junto con los departamentos de Energía y Defensa, empezaron a preparar informes sobre un centenar largo de sistemas y datos reservados. A finales de noviembre de 1992 y comienzos de 1993, los científicos pisaban el umbral del mundo opaco de la técnica secreta de los Estados Unidos. Los guiones sobre sistemas de captación de información, ayer y hoy, abarcaban desde el medio espacial hasta las profundidades submarinas; aportaban, además, pormenores minuciosos, como sus nombres en cifra —asunto reservadísimo en lo concerniente a los satélites del servicio de inteligencia—, sus posiciones y el tipo de datos que recogían. Aparte de suponer una ayuda a la hora de sopesar qué dato archivado podría importar en la investigación ecológica, los guiones entregados explicaban el modo normal de operar de los satélites, dispositivos de sonar y otros sistemas, así como las posibilidades de encauzarlos hacia la obtención de datos medioambientales.

Los expertos presentaron su primer informe en diciembre de 1993. En el mismo reseñaban que los ingentes archivos de datos en imágenes y el trabajo de los satélites de reconocimiento en servicio encerraban un notable valor para aproximaciones muy diversas de la investigación ambiental. Destacaron, por ejemplo,



2. EL SISTEMA DE VIGILANCIA ACUSTICA, SOSUS. Consiste en el despliegue de hidrófonos distribuidos sobre el suelo marino. A principios de los ochenta, unos 66 dispositivos operaban en los puntos aquí mostrados; con el final de la guerra fría se ha reducido su número.

que gracias a las imágenes archivadas podrían colmarse las lagunas de datos relativos a cambios en las pautas de urbanización, así como en las fronteras entre zonas de vegetación y los desiertos, modificaciones éstas que se consideran indicadores muy sensibles de las variaciones climáticas. Hasta 1972 no se lanzó el primer sistema con un cometido civil, el Satélite para la Técnica de Recursos Terrestres; sin embargo, la fototeca reservada adelantaba la información disponible a los principios de los sesenta.

No tardó en percibirse que las imágenes aportadas por los satélites de inteligencia facilitarían el "calibrado" de los sistemas civiles de menor definición. Al comparar la baja y la alta definición de imágenes relativas a un mismo objeto, podría extraerse información adicional de las fotografías de baja resolución. Esta nueva lectura sería especialmente útil para datos sobre vegetación; a modo de ejemplo, podrían determinarse las especies que medrasen y la extensión de la cubierta vegetal.

Además, las imágenes de alta resolución también podrían proporcionar un nivel ulterior de detalle para el estudio de la expansión o reducción de la masa boscosa, de desiertos y de humedales. Por otra parte, las imágenes podrían propiciar investigaciones más ajustadas en torno a las variaciones de suelo cultivable, integridad de los ecosistemas y hábitats animales, agresiones al bosque de carácter antropógeno, uso del agua y erosión del litoral. Temas, todos ellos, de capital importancia para la salud humana.

El informe aludía, asimismo, a la posibilidad de que los satélites DSP se utilizasen para la detección y seguimiento de la evolución de grandes incendios en regiones remotas; estos fuegos generan monóxido de carbono y dióxido de carbono, agentes del efecto invernadero. Sugería dicho informe que los despliegues de SOSUS se reorientasen para detectar el calentamiento global: el sonido se propaga por el agua caliente a velocidad mayor que por el agua fría; ello significa que todo cambio de temperatura, por mínimo que sea, queda reflejado en las mediciones de los cambios en la velocidad del sonido a través de miles de kilómetros de océano. Los SOSUS también podrían servir para registrar los movimientos de las ballenas, lo que aportaría nueva información sobre su población. Ese rosario de sugerencias tomó cuerpo en diversas misiones apoyadas por el Departamento de Defensa u otros promotores.

Son unos 15 experimentos los propuestos para averiguar si los sistemas de inteligencia servirían para determinar el grosor del hielo en el mar, el alcance de la deforestación, el contenido de agua en la troposfera y la existencia de escapes tóxicos y radiactivos bajo tierra.

Animados por el éxito de la colaboración, el servicio de inteligencia se planteó en 1994 la posibilidad de dotarla de carácter permanente. El nombre de Medea, escogido por Linda Zall, funcionaria de la CIA, recordaba la figura que en la mitología griega ayudó a Jasón y los Argonautas a robar el Toisón de Oro; Jasón la convirtió más tarde en su esposa. (No por casualidad Zall es la representante en la CIA de un grupo de asesores para cuestiones militares conocido con el nombre de Jasón.) Unos 70 científicos tienen todavía acreditaciones de seguridad, así como acceso a una oficina de programación en Mclean, estado de Virginia, cerca de la sede central de la CIA.

Los expertos adscritos a Medea han redactado más de una docena de informes sobre los beneficios que, para el progreso de las ciencias ambientales, reportan los datos archivados y los sistemas de recogida que están operando. Los informes se ocupan de los avances en las predicciones de las erupciones volcánicas, del refinamiento de los métodos para identificar y acotar los humedales, del aumento de la precisión en las estimaciones de las condiciones del oleaje y la circulación oceánica, y del cálculo del balance neto de los glaciares. Todos los informes salvo uno llevan marchamo de materia reservada.

El único informe exento, *Interés científico de los datos relativos al medio marino*, se publicó en junio de 1995. Respondía a una solicitud presentada por la Armada para que Medea examinara la base de datos, productos e infraestructuras del Comando Naval de Meteorología y Oceanografía. En las 52 páginas de un informe sobrio, se pasaba revista a las posibilidades científicas de las bases de datos del comando oceanográfico sobre hielo marino, geología y geofísica, así como sobre el volumen del océano y las propiedades de frontera. Incluía también una serie de recomendaciones ponderativas de las posibilidades que ofrece la ciencia oceánica. Por ejemplo, proponía el establecimiento de un centro de aprovechamiento para permitir a los científicos habilitados acceder a la mayor parte de las bases de datos y sugería que la marina redoblase su esfuerzo en construir modelos regionales del océano, que simulasen en el ordenador las condiciones reales en el mar.

Al grupo de Medea se le pidió también que estudiara la forma en que las modificaciones inducidas en los sistemas de satélites, operativos o en proyecto, incidirían en una recogida más eficaz de datos de interés ambiental. El resultado ha sido una docena más o menos de informes de doble uso y "un tanto esotéricos para la NRO", por repetir las palabras de uno de sus funcionarios. Los estudios

contienen recomendaciones específicas de ingeniería que, de acuerdo con el mismo responsable, "se han tomado en serio" y "se dejarán sentir" en futuros satélites de los servicios de inteligencia.

La intervención de Medea ha resultado decisiva en la elaboración del Programa Global de Confianza, por el que medio millar de puntos de interés para la ciencia ambiental se convertirán en blancos barridos por los satélites de fotorreconocimiento actuales y futuros. De entre los blancos previsibles, citaré la nubosidad de la costa californiana entre Los Angeles y San Diego, un bosque de lluvia tropical en La Selva (Costa Rica), el bosque experimental de Luquillo (Puerto Rico), el permafrost en Fish Creek (Alaska), los glaciares de Griegsletschner (Suiza) y las laderas altas del monte Kilimanjaro (Tanzania).

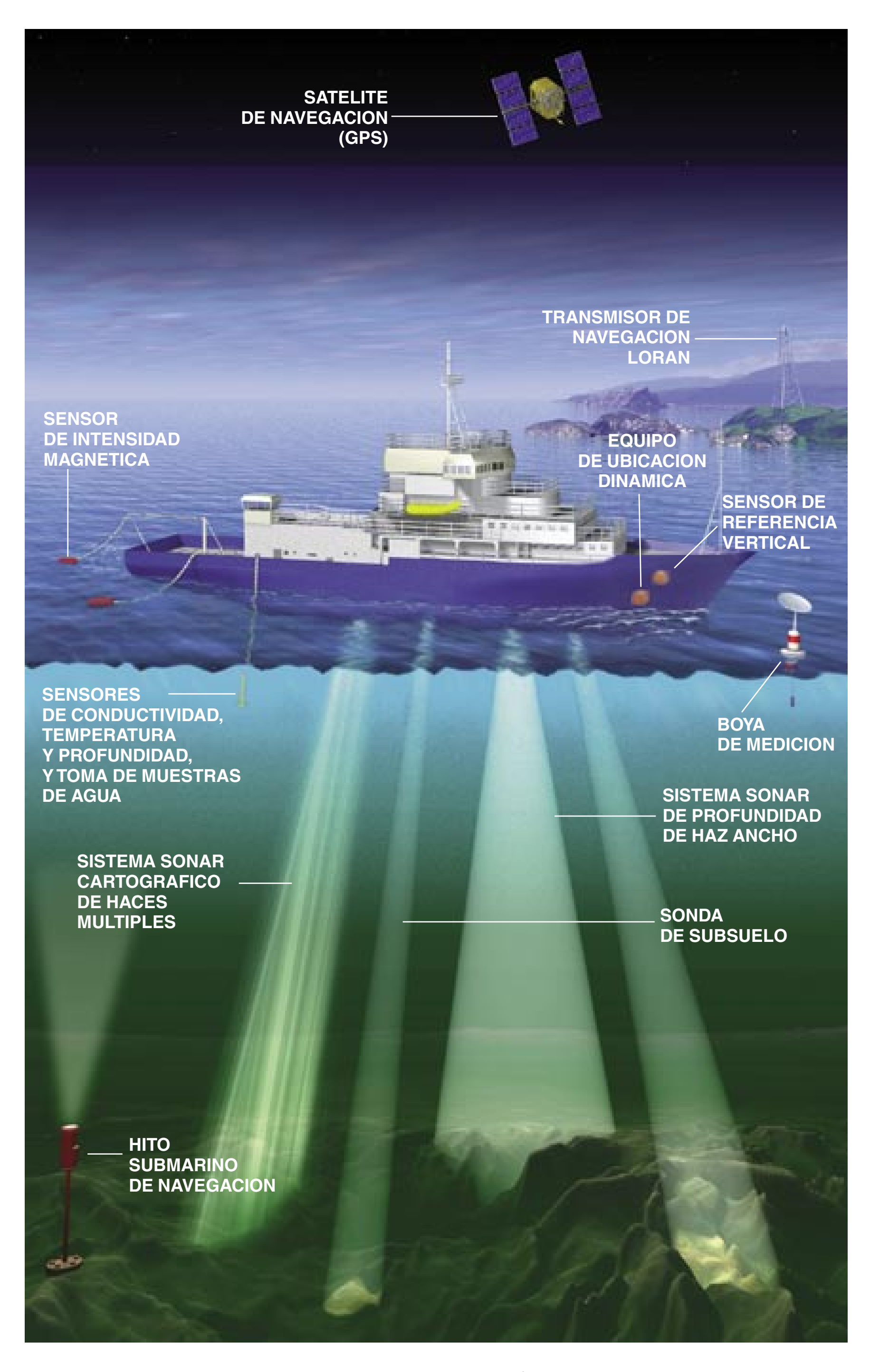
Herman H. Shugart, miembro de Medea y ecólogo de la Universidad de Virginia, espera que a partir de ahora y durante decenios las imágenes del Kilimanjaro proporcionen pruebas evidentes de cualquier aumento del dióxido de carbono en la atmósfera. Uno de los primeros indicadores naturales de ese incremento lo hallaríamos en la mayor densidad de vegetación en zonas altas de bosques tropicales, como las del Kilimanjaro. Tal aumento en verdor se percibiría de inmediato en las imágenes de reconocimiento.

Las imágenes se almacenarán en una fototeca reservada del Servicio de Inspección Geológica de EE.UU. Con todo, el acceso a los datos quedará restringido, durante los próximos veinte años, a quienes posean oportuna acreditación. Sin embargo, se espera que la desclasificación termine por abrir la inmensa base de datos a investigadores, profesores y doctorandos.

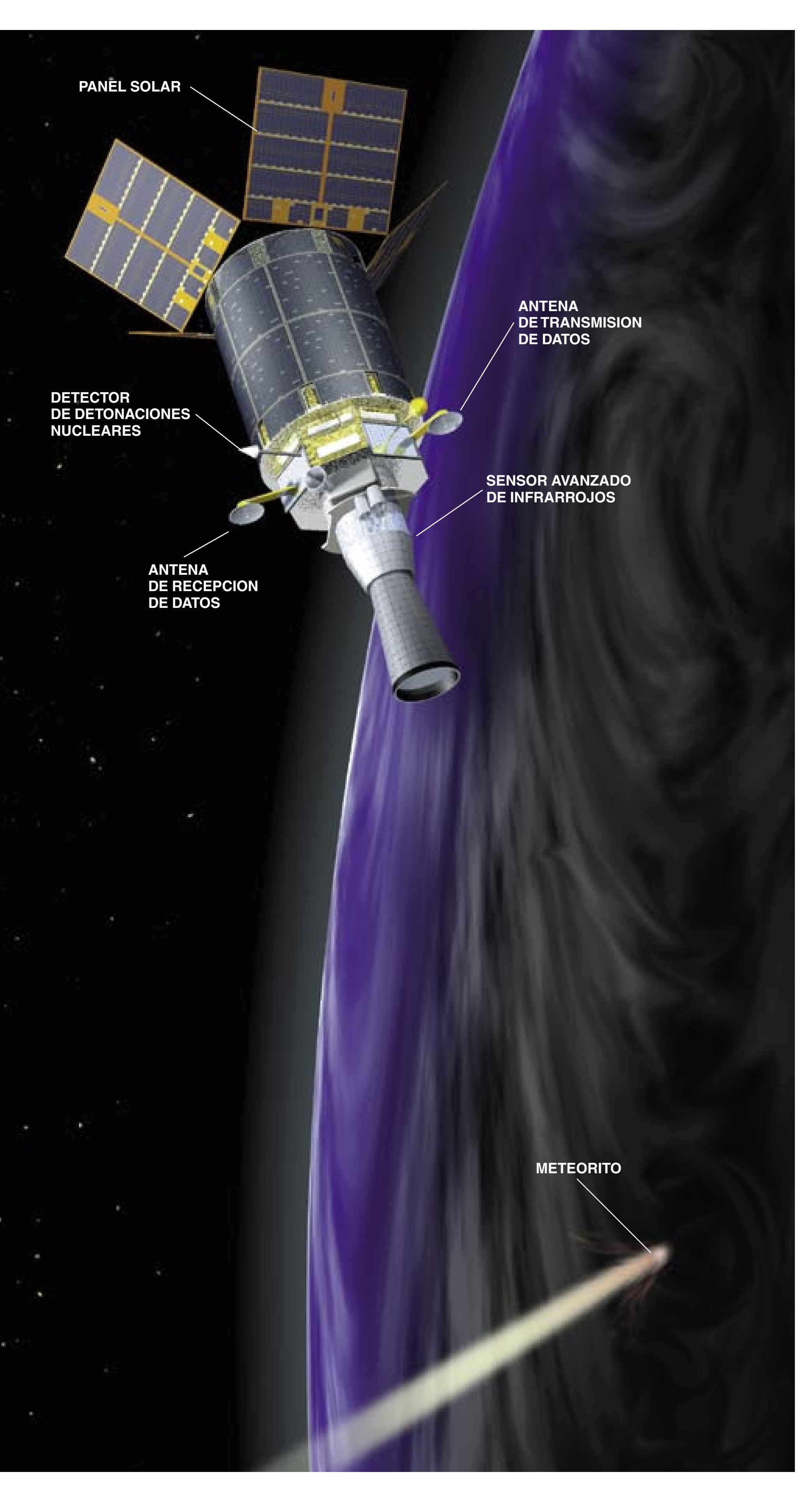
La moratoria ha recibido críticas. Steven Aftergood, director del Proyecto sobre el Secreto Gubernamental de la Federación de Científicos Americanos, declara "encomiable que el servicio de inteligencia tenga intención de incrementar la recogida de datos de interés ambiental". Aunque se apresuró a añadir que "es preocupante que quiera mantenerlos reservados durante décadas".

Pese a que la mayor parte del trabajo realizado por Medea se ha consagrado a la elaboración de informes sobre la potencial utilidad científica de los datos y sistemas del servicio secreto, hasta la fecha sólo han aparecido tres artículos que se funden en información reservada. Ofrecen una primera visión sugerente de la vinculación convergente entre los ámbitos de la seguridad y los de la ciencia, armonía ésta que se nos antoja todavía como algo lejana.

Replicación y verificación son los pilares en que se asienta la ciencia. Por replicación se entiende la posibilidad real que tiene un científico de reproducir los resultados de otro utilizando los mismos datos y medios; la verificación nos remite a la posibilidad real de demostrar la validez de esos resultados mediante



3. EL BUQUE DE INSPECCION TAGS-60 es el último de una serie iniciada hace cuatro décadas. Este barco de la marina estadounidense, al igual que otros instrumentos militares como los satélites de los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y la navegación por radio de largo alcance ("Loran"), está equipado con sensores muy diversos para medir los parámetros oceánicos de interés militar. Los sistemas sonar cartografían el suelo marino e incluso sondean el subsuelo.



4. EL SATELITE MILITAR DSP (Programa de Apoyo a la Defensa) tiene sensores infrarrojos diseñados para detectar la irrupción de meteoritos de tamaño considerable en la atmósfera terrestre. El 1 de febrero de 1994 un DSP detectó la llegada de un meteorito que explotó al penetrar en nuestra atmósfera y provocó la liberación de 630 kilotones de energía. La órbita geosincrónica del satélite se encuentra a 35.900 kilómetros.

la experimentación o la observación. A menudo, los expertos encargados por las revistas especializadas para que emitan un juicio sobre el artículo presentado solicitan información ulterior acerca del método de recogida de datos y la pericia con que se ha aplicado. Las preguntas pertinentes son las siguientes: ¿Qué instrumentos se han empleado? ¿Cuáles son sus posibilidades? ¿Con qué frecuencia y en qué condiciones se han realizado las mediciones?

El uso de material clasificado atenta contra el primer pilar. Quienes carecen de las acreditaciones necesarias (esto es, el resto de la comunidad científica) no pueden acceder a dicha información. Además, los revisores de los artículos quedan en una oscuridad cuando menos parcial a propósito de los métodos y los mecanismos de obtención de datos.

Dozier apunta que en algunos casos los resultados de este tipo de investigaciones pueden ser objeto de verificación, aun prescindiendo de la replicación, lo que incrementaría la fiabilidad de los métodos y los datos clasificados que se han utilizado para la consecución de esos resultados. A modo de ejemplo: podemos comprobar la exactitud de un mapa topográfico del fondo marino, aunque se desconozcan los medios con los que se levantó en su día. Admite, sin embargo, que una afirmación como ésta "no es aplicable a fenómenos transitorios": las características oceanográficas y atmosféricas podrían haber variado en el momento en que otros científicos se propusieran verificar los resultados.

Muchos de estos asuntos se han puesto sobre el tapete a raíz de la aparición de los dos primeros artículos salidos del telar de Medea. En 1996 *Global Change Biology* publicó un trabajo de William H. Schlesinger, de la Universidad de Duke y miembro de Medea, y Nicolas Gramenopoulos, de la Corporación Mitre. El artículo abordaba la cuestión de si, en áreas relativamente vírgenes de Sudán, el

desierto tendía a avanzar hacia el sur. Aprovecharon fotografías de reconocimiento de Sudán occidental realizadas por satélites y aviones entre 1943 y 1994. Con ese material, analizaron la masa arbórea de una docena de puntos secuenciados en dirección norte-sur. Las fotografías permitieron una ampliación notable del registro del cambio de vegetación en el Sahel africano elaborado desde 1980 gracias al radiómetro avanzado de muy alta definición, incorporado a un satélite, de la NOAA. Los autores apuntaron que la expansión del desierto implicaría un eventual aumento de hambrunas como consecuencia del cambio climático regional o global, pero los resultados obtenidos no evidenciaban un cambio significativo.

Schlesinger ofreció en un principio el artículo a *Science*. Renunció ésta a sacarlo porque muchas de las imágenes en las que los autores basaron sus conclusiones provenían de archivos clasificados. Schlesinger recuerda que los revisores invitados por *Science* querían conocer la disponibilidad, la definición y frecuencia de cobertura, cuestiones que él no podía aclarar sin revelar información reservada. A pesar de que la revista *Science* no practica una política de censura contra la publicación de este tipo de artículos, su directora editorial, Monica M. Bradford, comenta que "si los críticos no pueden evaluar lo que se les presenta, no se publica".

La información aportada sobre los sensores es poco menos que nula. Los autores se limitan a señalar que "para indicar la abundancia de masa arbórea en la provincia de Darfur, al oeste del Sudán, utilizamos los archivos fotográficos de detección remota de la aviación y de satélites dirigidos por los servicios de inteligencia y por el Departamento de Defensa".

La revista *Global Change Biology* sí publicó el artículo, pero la redacción consideró obligado añadir una apostilla de advertencia: "Muchos de los datos sobre los cuales se sustenta este artículo se encuentran, reservados, en los archivos del servicio secreto. En consecuencia, se hallan condicionadas las posibilidades de que otros científicos puedan reproducir los resultados y someter a crítica el artículo. *Global Change Biology* publica el artículo con el fin de poner de relieve el uso potencial de datos clasificados en los textos científicos, así como animar el debate sobre la función de los mismos en la exposición de los resultados. Las limitaciones de acceso a las fuentes ha impedido que los revisores técnicos de la revista enjuicien debidamente la calidad, la selección o la interpretación de los datos."

Otro artículo engendrado en el entorno de Medea versa sobre un tema de creciente interés entre astrónomos y el público en general: la posibilidad de que un meteorito de gran tamaño choque contra la Tierra. Uno de los firmantes del trabajo fue Thomas B. McCord, miembro de Medea y del Instituto hawaiano de Geofísica y Planetología.

El interés suscitado por el impacto de meteoritos indujo al Ejército del Aire a desclasificar datos relativos al programa DSP correspondientes a los primeros 17 años, desde su inicio en 1970. Los satélites DSP tenían por misión detectar la energía en infrarrojos liberada por explosiones cuya intensidad abarcara desde la destrucción de un avión hasta una detonación nuclear. Estos satélites también detectan el singular rastro infrarrojo que deja un meteorito de tamaño medio cuando, al penetrar en la atmósfera terrestre, explota.

Con su permiso acreditativo, McCord se concentró en el estudio de grabaciones del DSP y posiblemente de otros datos también concernientes a un meteoroide que irrumpió en la atmósfera terrestre el 1 de febrero de 1994 sobre el océano Pacífico central, cerca de la isla de Kosrae. De acuerdo con las estimaciones de McCord, la masa del meteorito oscilaba entre los 500.000 kilogramos y los 9 millones. Según informes sin corroborar la explosión del meteorito fue de tal magnitud, que el presidente Bill Clinton fue despertado en medio de la noche por unos agentes nerviosos que temían que un arma nuclear hubiese detonado en la atmósfera.

El análisis de McCord sobre el acontecimiento apareció en el número del *Journal of Geophysical Research* correspondiente al 25 de febrero de 1995. Las grabaciones proporcionadas por el DSP y posiblemente también por otros sensores le permitieron deducir la órbita, masa, fragmentación y energía liberada por el meteorito, que, según los cálculos, estaría entre los 34 y los 630 kilotones. El artículo ofrecía una explicación detallada sobre el lugar donde se detectó el meteorito (a una altitud de 54 kilómetros), su trayectoria, su ángulo de entrada, así como su irrupción en la atmósfera y los cálculos efectuados por los autores para determinar su órbita y energía liberada.



5. EL VOLCAN de la imagen, uno de los más altos del mundo, se encuentra en la península de Kamchatka, en el extremo oriental de Rusia. La comparación de imágenes de reconocimiento, como ésta tomada en 1962, permite una aproximación a la historia de la actividad volcánica de la península, un área de extrema actividad, tanto sísmica como volcánica.

No figuraba ninguna alusión explícita al programa DSP. En palabras de los autores, "es necesaria cierta vaguedad en relación con las explicaciones sobre las características de los sensores, porque todavía no tenemos libertad para hacer revelaciones". Lo único que señalaron, a propósito de las fuentes de obtención de sus datos, fue que se trataba de "sensores de longitud de onda en el infrarrojo y en el visible a bordo de plataformas dependientes del Departamento de Defensa".

A pesar de no formar parte de sus obligaciones oficiales, Medea asesora a los servicios de inteligencia en su tarea de seguimiento de la degradación del ambiente y las situaciones de emergencia. Los asuntos medioambientales fueron incluidos en el elenco de objetivos primordiales en 1993 cuando, por la directiva-12 del Consejo de Presidencia, se anunció que Clinton había decidido que "los asuntos medioambientales adquiriesen un peso significativo en la política de seguridad nacional".

En sus actividades relacionadas con el entorno, algunas de las cuales se centran en Rusia y Europa oriental, los analistas de los servicios de inteligencia cuentan con la colaboración de Medea a la hora de valorar los efectos de vertidos de petróleo

en la región rusa de Komi y residuos químicos de armamento ruso en el Artico. Según un oficial de la NRO los analistas de la Agencia de Imágenes y Cartografía del Departamento de Defensa “aprendieron algunos trucos” de los científicos sobre procesamiento de datos y su “fusión”; esto es, la combinación de los resultados aportados por sensores distintos (imágenes ópticas e imágenes radáricas) y crear así un único producto (una sola imagen) cuyo contenido informativo supera el de cualquiera de sus componentes.

Varios científicos de Medea han participado también en el grupo de trabajo medioambiental de la comisión encabezada por el vicepresidente Gore y el primer ministro ruso Viktor Chernomyrdin. Abordaron el intercambio de imágenes recogidas por satélites y datos derivados de las mismas como un modo de facilitar la limpieza ambiental de las zonas próximas a las instalaciones militares.

Tanto las inundaciones del norte de California en el invierno de 1996-97 como los daños producidos por el posterior huracán en el sudeste de EE.UU. son desastres recientes que han concentrado la atención de los servicios de inteligencia y de Medea. Estos intervinieron, asimismo, en el seguimiento de los cambios experimentados por el volcán de la isla de Montserrat poco antes de que entrara en erupción en 1995. Dichos controles permitieron un aviso oficial al Gobierno de la isla, que pudo preparase para evacuar a 4000 personas de la zona de peligro.

Sin aviones suficientes para hacer frente a la extensión de las llamas, le fue difícil al servicio forestal estadounidense seguir la pista de los incendios que azotaron Alaska en junio de 1996; afortunadamente, la tarea resultó sencilla para los satélites de reconocimiento y del DSP.

Son innegables los éxitos de Medea. Pero deben replantearse algunos puntos, sobre todo si se pretende ampliar el programa. No se oculta el temor de que un uso abusivo de datos clasificados por organismos civiles impida una discusión libre y abierta sobre algunas de las directrices por las que se rige. Los responsables del servicio secreto podrían mostrarse cautos en su comparecencia pública y, los expertos ajenos al programa, ver coartado su acceso irrestricto a los datos en los que se basan y justifican dichas políticas. En otro orden, el recurso a los medios del servicio de inteligencia dedicados a la investigación medioambiental bloquearía el desarrollo y la utilización de una generación de satélites comerciales de relativa alta definición lanzados en apoyo de la investigación medioambiental, cuyos resultados estarían al alcance inmediato de una audiencia mucho más amplia.

Por lo demás, se ha demostrado carente de fundamento el recelo de que las aplicaciones científicas roben demasiado tiempo a las necesidades del servicio secreto. Si creemos a Bo Tumasz, del programa de inteligencia medioambiental de la CIA, el tiempo invertido por los satélites de reconocimiento en la recolección de datos sobre el entorno no ocupa ni siquiera el 1 % de su trabajo.

Contra estos temores hay que sopesar los beneficios, demostrados y potenciales, que ofrece Medea. Además de asegurar la disponibilidad de una base de datos bien diseñada para los científicos del siglo XXI, Medea actúa como fuerza promotora de futuras desclasificaciones. Propuso, por ejemplo, la divulgación de las imágenes archivadas de relevancia medioambiental, con una definición intencionadamente más burda que la de los satélites actuales. Aunque llegado el momento los responsables del servicio secreto rechazaron la propuesta, si no existiera Medea, ni siquiera se habría planteado tal eventualidad.

En definitiva, Medea es en sí misma un experimento y el trabajo de sus participantes. Como con cualquier experimento, habrá teorías, hallazgos inesperados y, así lo espero, avances, si madura esta colaboración única entre científicos y espías.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CORONA: SUCCESS FOR SPACE RECONNAISSANCE: A LOOK INTO THE COLD WAR. Robert A. MacDonald en *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, n.º 6, páginas 689-720; junio 1995.

A MOMENT ON THE EARTH: THE COMING AGE OF ENVIRONMENTAL OPTIMISM. Gregg Easterbrook. Viking, 1995.

SCIENTIFIC UTILITY OF NAVAL ENVIRONMENTAL DATA. Oficina del Programa Medea, McLean, Va., 1995 (teléfono: 703-883.52.65).

USING INTELLIGENCE DATA FOR ENVIRONMENTAL NEEDS: BALANCING NATIONAL INTERESTS. Scott Pace y col. Rand, Santa Mónica, California, 1997.

Tim Beardsley

FRANCIS S. COLLINS: Entre la genética y la fe

Hallar reunidos en una misma persona una primera figura mundial de la investigación genética, un político ponderado, un responsable de un programa federal y un cristiano de fe robusta no es moneda corriente. Pero convergen en el caso de Francis S. Collins.

Collins dirige el Proyecto Genoma Humano en los Estados Unidos, un programa ambicioso que se propone analizar la herencia genética del ser humano en su constitución molecular. Su nombre apareció en los medios de publicación en 1989, cuando con varios colaboradores suyos en la Universidad de Michigan descubrió —mediante una técnica llamada clonación posicional— el gen humano que, caso de mutar, provocaba la fibrosis quística. Gracias a ese hallazgo se contó muy pronto con pruebas para el diagnóstico prenatal de la enfermedad.

Desde entonces Collins ha intervenido eficazmente en la dirección de proyectos para identificar genes causantes de patologías temibles. Citemos en su haber el descubrimiento de los genes implicados en la neurofibromatosis y en la enfermedad de Huntington, así como en otras afecciones más raras: la ataxia telangiectasia y la neoplasia endocrina múltiple de tipo 1. En 1993 Collins dejó Michigan para ponerse al frente del Instituto de Investigación Nacional del Genoma Humano, una responsabilidad cuyo ofrecimiento había rechazado seis meses antes.

Las pruebas genéticas han salvado vidas, dice Francis S. Collins, pero mantiene sus reservas de que no lleguen a emplearse para practicar abortos ante situaciones que no son ni remotamente trágicas

En su despacho del Instituto Nacional de Salud en Bethesda, se encuentra, a sus 47 años, en el foco de un torbellino de temores y esperanzas médicas sin igual. Muchos perciben en él al capitán decidido a cumplir su compromiso: secuenciar las tres mil millones de bases que componen el ADN humano para el año 2005. Pero el ámbito de influencia de Collins trasciende las paredes de los laboratorios. Nadie duda de su peso en la normativa en pro de que no se pierda el seguro contratado por motivos de taras o enfermedades hereditarias.

Acaba de empeñar su crédito en "una meta que si bien pudiera resultar costosa es, desde luego, muy importante". Con ella espera rematar la faena del proyecto genoma. Collins quiere crear un catálogo de dominio público sobre polimorfismos de un único nucleótido (SNP), unas sutiles variaciones del genoma humano. Esta labor constituiría "un cambio muy significativo en la concepción de lo que podría ser el proyecto genoma", pondera. Los SNP se detectan comparando las secuencias de ADN obtenidas de diferentes personas.

A diferencia de la clonación posicional, el análisis de SNP puede dar rápidamente con grupos de genes que, aunque determinantes de una patología tomados en conjunto, uno por uno apenas si influyen. Patologías determinadas por genes múltiples son la diabetes, la hipertensión y algunos trastornos mentales. Para detectar mutaciones simultáneas en grupos de genes puede recurrirse a unas nuevas "fichas" de ADN, pequeñas láminas de cristal que contienen surtidos microscópicos de secuencias de ácidos nucleicos. Utilizando esta técnica, podrían emplearse los SNP en diagnósticos rápidos.

Collins se pasa ahora la cuarta parte de su tiempo recabando apoyos en el NIH para un repertorio de SNP. En pro de su causa aduce que, si se abandona el interés público por los SNP, las compañías privadas no tardarán en echarle el ojo a esos indicadores moleculares y patentarlos. Quizá sólo haya unos 200.000

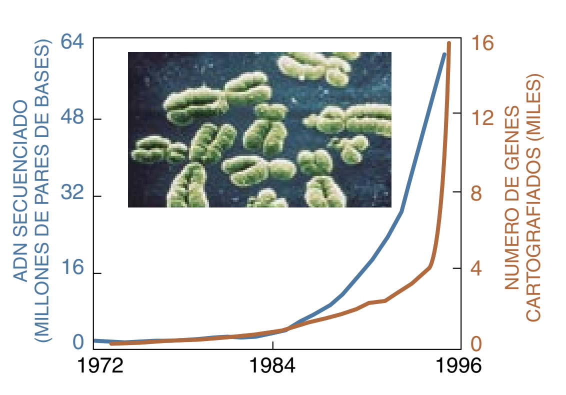
SNP de los más valiosos, de modo que las patentes podrían impedir que los investigadores los usaran, excepto a través "de un complicado entramado de licencias".

Collins, informal en su atuendo y adicto al transporte en motocicleta, se siente "increíblemente afortunado" al timón de un proyecto "que me parece que con los años va a acabar cambiándolo todo". Le gusta componer canciones que acompaña con su propia guitarra, afición que le recuerda su infancia y juventud en la campiña de Virginia, donde nació. En la universidad del estado estudió la carrera de químicas con las mejores notas. Se doctoró en química física por Yale. Luego marchó a la Universidad de Carolina del Norte a estudiar medicina. Pronto la emprendió con la genética.

La secuenciación a gran escala del ADN humano no fue iniciada hasta el 1996, después de que se hubo conseguido una cartografía preliminar. Hasta el momento, sólo se ha secuenciado el 2 por ciento del total del genoma humano. El problema es el precio, cifrado ahora en unas 75 pesetas por cada par de bases. Collins necesita que esa cifra baje hasta las 30 pesetas. Si bajase hasta las 15, los secuenciadores de genes podrían atreverse también con el ratón, algo que le gustaría hacer porque las comparaciones aclararían cómo está organizado el genoma. En el otro platillo de la balanza está la necesidad de asegurar la reproducibilidad. Este año Collins ha puesto en marcha pruebas cruzadas entre laboratorios para asegurar que la precisión de la secuencia es superior al 99,99 por cien.

Señala con satisfacción que hoy hay gente que está viva y que podría haber muerto sin las pruebas genéticas que alertaron a los médicos sobre sus problemas. Los pacientes con determinados tipos de cáncer de colon hereditario, que puede recibir tratamiento quirúrgico, son los ejemplos más notables. Llegado el caso, las pruebas para encontrar genes que predisponen a la neoplasia endocrina múltiple tipo 1 y quizás al cáncer de mama y de ovario podrían salvar vidas, opina.

El Congreso de los Estados Unidos financió el proyecto genoma con la esperanza de que se obtuvieran curas. Mas para la mayoría de las enfermedades a las que Collins ha hecho contribuciones importantes, la única medida eficaz es el aborto del feto



El número de genes humanos cartografiados, que se encuentran en los cromosomas (fotografía)*, va en aumento, pero sólo se han secuenciado 64 millones de bases, un 2 por ciento del total.*

afectado. Collins, que habla siempre con desenvoltura, mide en este punto sus palabras: "me siento incómodo ante el aborto como solución a cualquier cosa".

Admite con llaneza que sus opiniones brotan de la creencia "en un Dios personal". Los humanos tienen un sentido innato de lo que está bien y lo que está mal que "no parece derivarse en absoluto" de la teoría de la evolución. Y admite su propia "incapacidad, científica, de percibir un momento preciso en el que empiece la vida distinto del momento de la concepción". En ese esquema mental razonado se entiende que guarde "algunas preocupaciones" ante la posibilidad de que las pruebas genéticas y el aborto terminen por emplearse para prevenir situaciones que están lejos de ser desastrosas, como la predisposición a la obesidad.

La reciente película *Gattaca* presentó a los espectadores la perspectiva de un futuro próximo en el que la investigación genética permitirá diseñar los bebés con los rasgos específicos que se deseen. Collins piensa que es "prematuro empezar a frotarse las manos" con la posibilidad de la mejora genética. Pero afirma, "a mí personalmente me parece que es un sendero en el que no debiéramos adentrarnos, ni ahora ni por mucho tiempo; quizá nunca".

Los investigadores y académicos familiarizados con el trabajo de Collins le reconocen su exquisita separación entre sus opiniones ante la vida y su labor profesional. Paul Root Wolpe, de la Universidad de Pennsylvania, afirma que "la historia [de Collins] no ha mostrado ningún condicionamiento de las creencias religiosas en su trabajo, como no sea una sensibilidad general hacia los asuntos éticos en la genética". Leon E. Rosenberg, de Bristol-Myers Squibb, uno de sus maestros, admite que "el hecho de que declare públicamente su fe cristiana es el mejor revulsivo contra cualquier posible conflicto".

Pese a esa aprobación general, Collins no carece de críticos. John C. Fletcher, un ex-ministro episcopaliano que dejó su iglesia y fue director del Centro de Etica Biomédica de la Universidad de Virginia, le recrimina el no haber presionado para levantar la actual prohibición sobre el uso de fondos federales para la investigación en embriones humanos. Investigar con embriones podría aportar mejores tratamientos del cáncer pediátrico, piensa Fletcher.

En 1996 Collins sufrió lo que llama "la experiencia más dolorosa de mi carrera profesional". Un estudiante suyo de doctorado "brillantísimo" falsificó resultados experimentales sobre la leucemia que se habían publicado en cinco artículos en los que Collins y otros figuraban como coautores. Cuando Collins le presentó un pliego de pruebas, el estudiante confesó. Pero Collins piensa que sus sentimientos de incredulidad y de traición "no se borrarán nunca".

El fraude fue detectado por un avispado especialista, que se dio cuenta de que algunas fotografías de electroforesis de geles que aparecían en los manuscritos estaban copiadas. Como resultado, Collins dice que cada vez que alguien proyecta una película en una reunión, "ahora instintivamente voy vigilando para ver si encuentro una traza de que algo ha sido manipulado". Desde que el fraude se conoció un "inquietante" número de científicos se han puesto en contacto con él para describir experiencias similares.

Collins todavía dirige su propio laboratorio, y continúa insistiendo en un programa de acción "claramente definido". Estos compromisos le mantienen ocupado. Pero no hasta el punto de renunciar a pasar un mes con su hija Margaret, que es médico en un hospital de Nigeria. Durante su última visita, hace casi 10 años, salvó la vida de un hombre en una dramática operación a vida o muerte llevada a cabo únicamente con el instrumental más básico. Esos trabajos complementarios son, para Collins, expresión de su fe. No sólo eso: "Me parecía una cosa maravillosa compartirlo con mi hija".

Mare nostrum

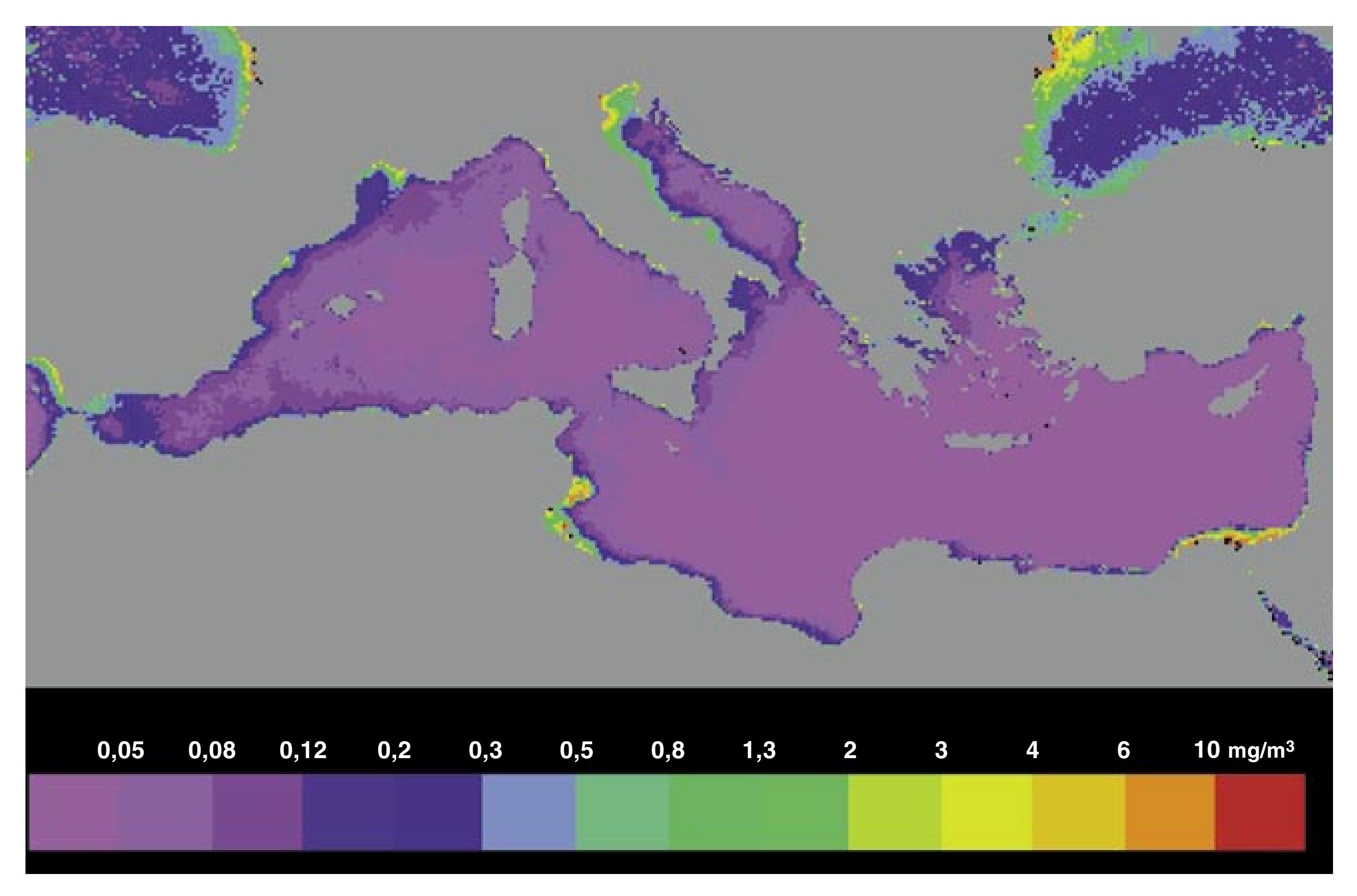
Un modelo a examen

En Roma, y en noviembre del año pasado, se celebró una conferencia internacional para dar cuenta del progreso en la oceanografía del mar Mediterráneo. Cerrábase así la fase piloto del "Proyecto dirigido del Mediterráneo" (MTP I, del programa MAST de la UE) y se abría la segunda fase del mismo. Acudieron a la reunión cerca de 300 científicos procedentes de Europa, norte de Africa, Estados Unidos, China y Japón. La idea convocante era la de alcanzar una síntesis del estado de nuestros conocimientos sobre la variabilidad presente y pasada del ambiente marino, las características de los flujos biogeoquímicos y la producción y dinámica de los ecosistemas bénticos y pelágicos, entre otros.

Aunque en el Mediterráneo se dan prácticamente todos los procesos que pueden encontrarse en los océanos, sus reducidas dimensiones facilitan el estudio comparativo de fenómenos que en otras áreas se encuentran muy separados desde un punto de vista geográfico. Por otra parte, su tamaño restringido y su relativo aislamiento convierten a nuestro mar en un escenario óptimo donde observar los efectos de impactos antropogénicos y detectar posibles signos de cambio global. En este sentido, alguien comparó allí el Mediterráneo al canario que los mineros llevaban consigo antaño para detectar la presencia de metano.

Una fuente de información sobre la variabilidad del Mediterráneo la constituyen las capas de sapropel en sedimentos depositados durante los últimos 10.000 años en su cuenca oriental. Los sapropeles son barros negruzcos con alto contenido orgánico. Se ha asociado su presencia a períodos de elevada productividad biológica, posiblemente combinada con mejores condiciones de conservación de la materia orgánica sedimentada. El origen de los nutrientes necesarios para estos aumentos de productividad parece haber sido el incremento de las precipitaciones y del caudal de los ríos, incluidos algunos ahora extinguidos del Sáhara y Anatolia.

La elevada relación de perímetro a área que presenta la cubeta mediterránea se refleja en el papel que los materiales de origen continental y el transporte horizontal ejercen sobre la distribución de la materia particulada



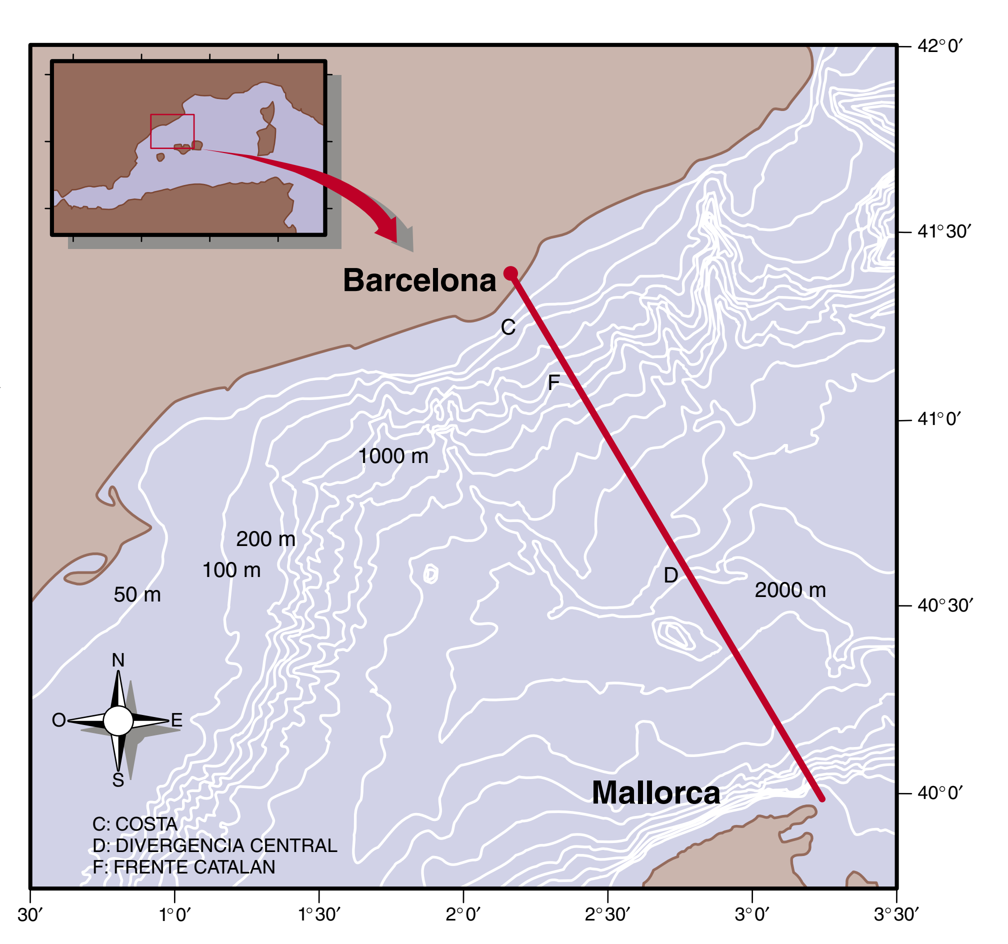
1. Pigmentos fitoplanctónicos en el Mediterráneo durante el mes de julio. Promedio de escenas recogidas por el Escáner Cromático de Zona Costera entre 1979 y 1985. Las concentraciones son bajas (alrededor de 0,03 miligramos por metro cúbico) y disminuyen desde el Mediterráneo Occidental al Oriental. Obsérvese el contraste con las mayores concentraciones de pigmentos en el Golfo de Vizcaya y el Mar Negro. Imagen preparada por IRSA, JRC-EC

en suspensión en la columna de agua y sobre el transporte de carbono orgánico y otros materiales hacia el sedimento. Aparte de las descargas fluviales y las precipitaciones, se ha demostrado la importancia de los aportes eólicos para el flujo de ciertos elementos. Por otra parte, en el área volcánica del sur del mar Egeo existe una intensa actividad hidrotermal.

La comparación de mediciones realizadas durante los últimos 40 años ha puesto de manifiesto un incremento de la temperatura y salinidad de las aguas profundas de nuestro mar. Mientras que una mayor temperatura podría relacionarse con un calentamiento global del planeta, el aumento de salinidad parece tener su origen en la reducción de aportes de agua dulce debida a la entrada en servicio de embalses, como el de Asuán. Estas alteraciones pueden haber causado cambios importantes en la circulación termohalina del Mediterráneo. A través del estrecho de Gibraltar fluye hacia el Atlántico agua profunda del Mediterráneo, más salada y densa. Esta salida, más la pérdida neta por evaporación en la cubeta mediterránea, queda compensada por la entrada de agua superficial atlántica. Ese tipo de circulación, opuesta al intercambio típico de un estuario positivo (que pierde agua superficial y recibe agua en profundidad), se repite en el estrecho de Sicilia.

En ciertas regiones del Mediterráneo, la combinación de efectos de evaporación y enfriamiento invernal provoca un aumento de la densidad de las masas de agua superficiales, de modo que acaban hundiéndose hacia el fondo. Nos referimos a la formación de agua profunda, descrita, típicamente en el golfo de León y el sur del Adriático. Sin embargo, en la última década han tenido lugar importantes episodios de formación de agua profunda en el mar Egeo, probablemente debido a la disminución de aportes de agua dulce en superficie y a una redistribución del contenido de sal en las aguas de la cuenca.

Desde el punto de vista biológico, el Mediterráneo es un mar oligotrófico, es decir, pobre en nutrientes como nitrato y fosfato. Por eso, los productores primarios (fitoplancton), integrados básicamente por algas y bacterias autótrofas que crecen en la capa superior, iluminada, de la columna de agua (la zona fótica), ven pronto limitada su reproducción, a no ser que las corrientes o la mezcla vertical favorezcan el aporte de aguas profundas, ricas en nutrientes.

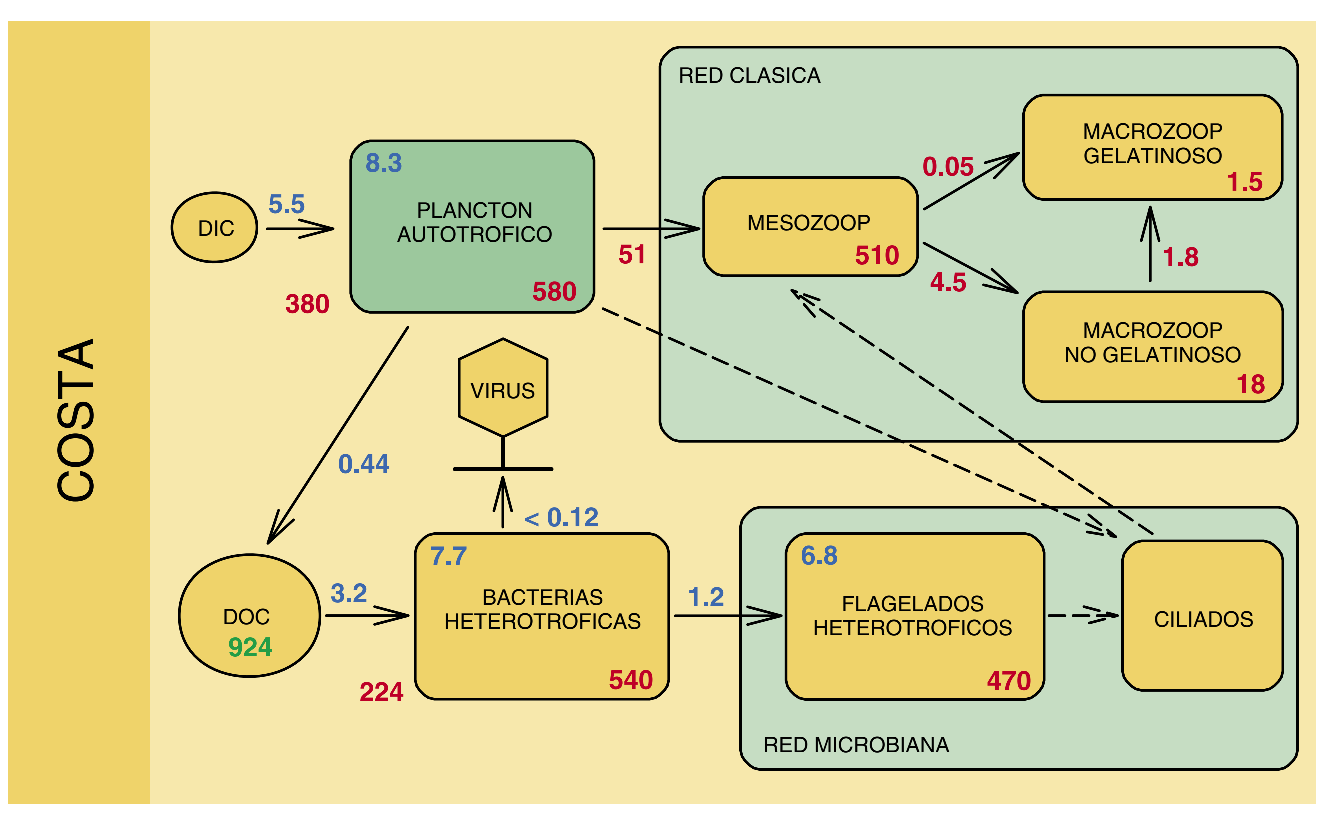


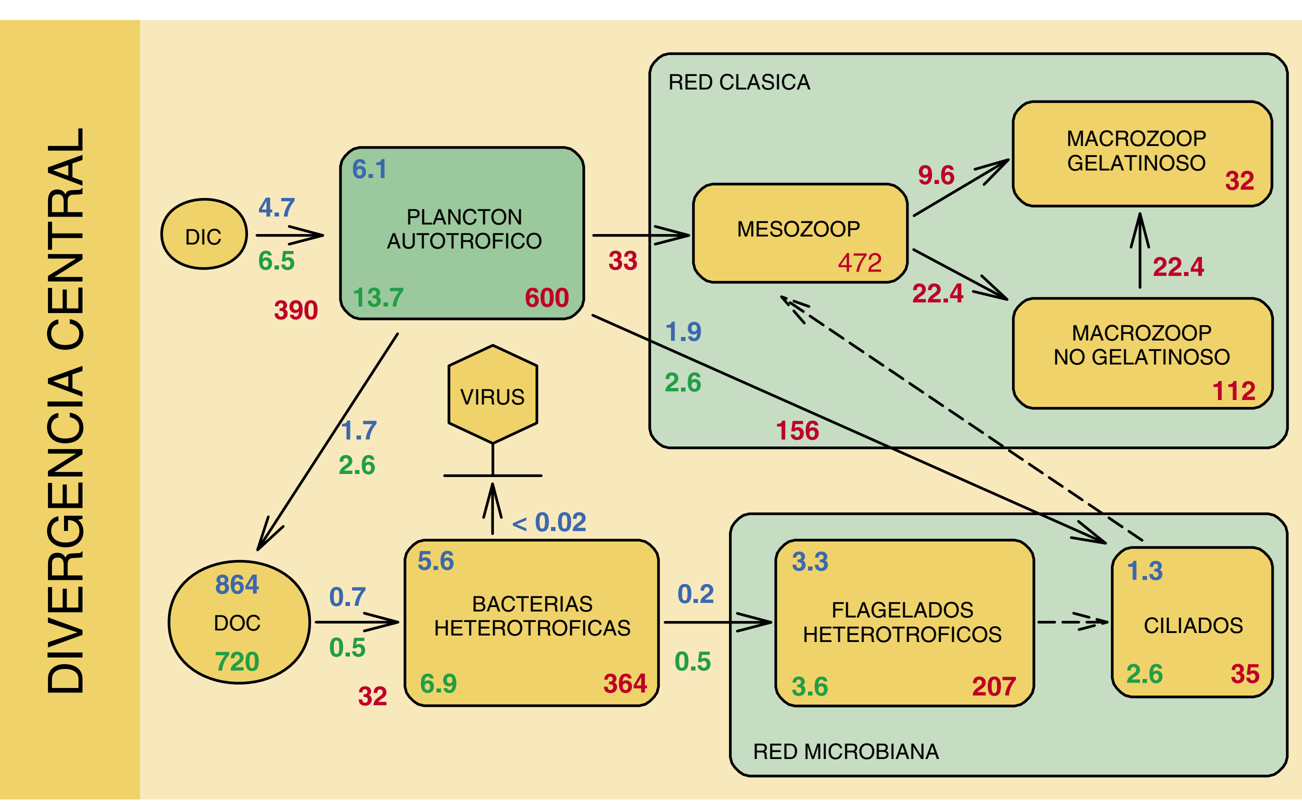
2. Mar catalano-balear. Posición del transecto con las estaciones oceanográficas a que se refieren los datos de la figura siguiente

A diferencia de lo que ocurre en otras regiones oceánicas, el elemento que limita la producción biológica no es el nitrógeno, sino el fósforo. Lo que no impide que, debido a la oligotrofia general, la limitación por nitrógeno (y silicio en el caso de las diatomeas) pueda aparecer en ciertos lugares y momentos. Entre las causas de la oligotrofia del Mediterráneo se cita la pérdida continuada de aguas profundas, ricas en nutrientes, a través de Gibraltar; por ello, las aguas mediterráneas son más pobres que las vecinas aguas atlánticas. Un intercambio similar (flujo de aguas profundas hacia el oeste y superficiales hacia el este) a través del estrecho de Sicilia origina un gradiente decreciente de producción desde el Mediterráneo occidental hacia el Mediterráneo oriental. A esta pauta general se superponen importantes variaciones hidrográficas interanuales y estacionales.

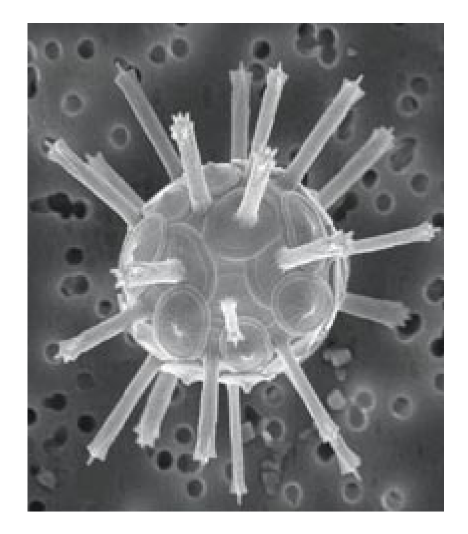
Por otra parte, existen fenómenos episódicos de fertilización debidos a procesos varios: perturbaciones en zonas frontales, mezcla vertical causada por el viento, aporte de nutrientes a través de las precipitaciones o efecto de descargas fluviales tras un temporal. Estos mecanismos intermitentes de fertilización ejercen una poderosa incidencia en el funcionamiento del ecosistema mediterráneo; sin embargo, son difíciles de muestrear. El no haberlos tenido en cuenta puede explicar paradojas como la existencia de una producción pesquera relativamente elevada para los modestos valores de producción primaria que suelen aceptarse. Uno de los principales desafíos del estudio oceanográfico del Mediterráneo (y de otros mares) es la elaboración de técnicas para captar variaciones episódicas y para medir variables biológicas a escalas espacio-temporales compatibles con las que pueden utilizarse para el muestreo de variables físicas como la temperatura.

La frecuencia e intensidad de los mecanismos de fertilización condicionan la estructura de las cadenas tróficas en el ecosistema marino. De manera simplificada, se pueden distin-





3. Diagramas de flujo de carbono para condiciones típicas de la época de estratificación en las zonas costeras y de la divergencia central del mar catalán. Las cajas representan biomasas y las flechas, flujos. Las flechas de trazo discontinuo indican flujos para los que no se tienen datos. Las concentraciones de biomasa (en miligramos de C por metro cúbico) se han representado en azul para las capas de superficie y en verde para el nivel del máximo profundo de clorofila (en aguas estratificadas, las máximas concentraciones de fitoplancton y de clorofila se dan a profundidades de 40-60 m). Las cifras rojas representan valores integrados (miligramos de C por metro cuadrado) para la zona fótica. Los flujos están en unidades de miligramos de C por metro cúbico y día. (Por convención, mesozoop y macrozoop abrevian los términos mesozooplancton y macrozooplancton). Datos del grupo de ecología pelágica del Instituto de Ciencias del Mar, CSIC, Barcelona.






4. Imágenes de cocolitoforales (un grupo de fitoplancton caracterizado por sus cubiertas de plaquitas calcáreas) obtenidas con el microscopio electrónico de barrido. Fotos: Lluïsa Cros y José Manuel Fortuño (Instituto de Ciencias del Mar)

guir dos vías de transferencia de la producción primaria a otros niveles tróficos: la vía clásica y la de la red trófica microbiana. La vía clásica se basa en fitoplancton de cierto tamaño (superior a unos pocos micrometros), que es ingerido por organismos del meso y macrozooplancton (copépodos, etc.) que forman la base de la alimentación de muchos peces comerciales. El predominio de la vía clásica va asociada a una importante sedimentación de material orgánico particulado, formado por agregados de fitoplancton o por paquetes fecales de zooplancton. Cuando el tamaño de los productores primarios no llega a unos pocos micrometros (suele utilizarse el término colectivo de picoplancton para designar el plancton menor de 2 micrometros) pueden ser consumidos por microheterótrofos unicelulares (flagelados y ciliados) de tasa de crecimiento rápido. En este caso, ocurren pérdidas significativas de carbono a través de los intercambios tróficos y llega poca materia particulada al sedimento.

En principio, la oligotrofia favorece el desarrollo de productores primarios de pequeño tamaño (y, por tanto, mayor relación superficie/volumen); favorece también el predominio de la red trófica microbiana. Asimismo, la relación entre la producción primaria o autotrófica y la de las bacterias heterotrófas varía en función de la fertilidad del sistema, ya que algas y bacterias compiten por elementos escasos como el fósforo.

El predominio de las vías tróficas clásica o microbiana tiene importantes implicaciones biogeoquímicas, debido a que va asociado a diferencias en los flujos y sedimentación de carbono. De ahí el interés que despiertan la estructura y funcionamiento de las redes tróficas marinas. Su estudio requiere la recogida de datos sobre las biomasas de los principales componentes de las redes tróficas y los flujos de carbono entre ellos. Tales conjuntos de datos eran muy escasos, pero en la conferencia de Roma se presentaron algunos ejemplos. Una comparación, realizada a grandes rasgos, entre el Mediterráneo occidental y el oriental reveló que, según era de esperar, la relación entre producción primaria y producción bacteriana heterotrófica aumentaba hacia el oeste, al mismo tiempo que la productividad del sistema.

A escala espacial más detallada, un grupo de investigadores del Instituto de Ciencias del Mar (CSIC) de Barcelona presentó resultados de varias campañas realizadas, durante el período de estratificación de primavera-verano, a través del frente de talud del mar catalano-balear. Los datos obtenidos pusieron de manifiesto que la regulación de las relaciones entre producción primaria y heterotrófica es compleja. La menor profundidad de la termoclina (el gradiente que separa la capa superior, bien mezclada, de las capas inferiores, más densas, de la columa de agua) en la zona central, aguas afuera del frente catalán, y la presencia de perturbaciones en el frente podían explicar el mantenimiento de una producción fitoplanctónica moderada en estas zonas. Sin embargo, la producción bacteriana, más elevada en aguas costeras y del frente que en la región central, no se relacionaba sólo con la concentración de nutrientes inorgánicos, sino que parecía responder a la mayor disponibilidad en la costa de materia orgánica procedente de aportes de aguas continentales.

El establecimiento de relaciones generales como las comentadas entre grado de oligotrofia y estructura de las cadenas tróficas no debe hacer olvidar que expresiones del estilo de “productores primarios” o “red trófica microbiana” esconden una espectacular variedad de formas y estrategias de vida. Algunos de los resultados presentados en Roma destacaron la importancia teórica y las implicaciones prácticas de considerar conjuntamente la variabilidad ambiental y la diversidad biológica.

MARTA ESTRADA
Instituto de Ciencias del Mar,
CSIC, Barcelona

Células asesinas

Estrategias

Vivimos en un medio en el que los microorganismos y otros agentes potencialmente patógenos nos atacan sin cesar. Para luchar contra estas agresiones disponemos de un refinado mecanismo de defensa: el sistema inmunitario. Este complejo entramado se basa en la existencia de diferentes tipos de células, cada una de ellas especializada en el cumplimiento de una misión concreta: los macrófagos, por ejemplo, fagocitan partículas de origen extraño, las fragmentan y las exponen en su superficie para que se desencadene la respuesta adecuada.

Esta respuesta incluye la activación de los linfocitos *T* coadyuvantes, células especializadas en secretar productos químicos (citoquinas) que activan o desactivan otras células del sistema inmunitario. Los linfocitos *B* producen anticuerpos, proteínas que se unen a un patógeno y desencadenan el mecanismo que ocasionará su destrucción. Los linfocitos *T* citotóxicos están capacitados para reconocer y matar células infectadas por virus (dichas células susceptibles de ser atacadas por un linfocito reciben el nombre de células diana).

Existe, además, otro tipo de células cuya importancia se ha reconocido recientemente. Se trata de las células asesinas (NK, del inglés "Natural Killer"). Representan una minoría entre las células sanguíneas y su mecanismo de acción todavía presenta puntos obscuros. Las células asesinas son linfocitos de gran tamaño que participan en la lucha contra algunas células infectadas por virus, células tumorales y células no reconocidas como "propias" del individuo. Las células asesinas viajan por la sangre explorando la superficie de otras células que encuentran a su paso, buscando el distintivo de "célula propia y, además, sana". Sin tal distintivo, su misión es acabar con ella.

El santo y seña que buscan las células asesinas es la molécula del complejo principal de histocompatibilidad (MHC, del inglés "Major Histocompatibility Complex"). El MHC de clase I es una familia de proteínas que se expresa en la superficie de todas las células del organismo dotadas de núcleo. Cada célula muestra en su superficie varios miembros de esta familia en una combinación que resulta peculiar de cada individuo.

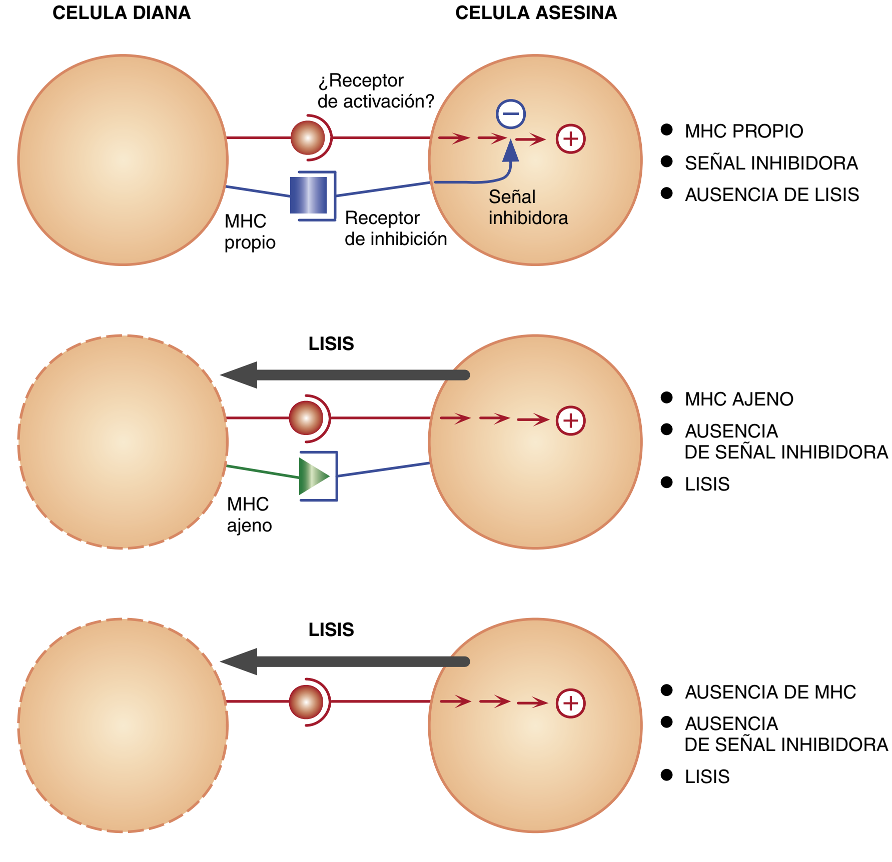
La naturaleza del MHC se conoce bastante bien. Los linfocitos *T* requieren su presencia en la célula diana para llevar a cabo su función. Y se habla de restricción por el MHC para indicar que el linfocito *T* sólo atacará las células infectadas que presenten péptidos antigénicos en el contexto del MHC.

Pero las células NK no están restringidas por MHC, sino reguladas por dicha molécula. El mecanismo de acción de las células NK requiere un complicado sistema de regulación que les permite tolerar las células normales y, al mismo tiempo, detectar y eliminar las extrañas. Necesitan, pues, un equilibrio de señales: por un lado señales activadoras (positivas) que conducen a la lisis de la célula diana y, por otro, señales inhibidoras (negativas) que suspenden dicha destrucción.

No se conoce el mecanismo en cuya virtud se activa la célula asesina. Se puede atribuir a la existencia de receptores capaces de enviar la señal positiva que da lugar a la lisis de la célula diana; o bien a la posibilidad de que la célula NK permanezca activada de forma constitutiva, es decir, que siempre está dispuesta a matar a no ser que reciba una señal inhibidora.

Por lo que concierne a la inhibición, se sabe que ocurre a través de unos receptores que se expresan en la superficie de las células asesinas. Dichos receptores inhibidores reconocen la molécula del complejo principal de histocompatibilidad. Cuando el MHC de una célula normal del individuo interacciona con el receptor específico de la célula asesina, se inhibe la acción de ésta. Pero si la célula NK no encuentra el MHC propio, se desencadena el ataque (lisis) contra la célula diana.

Por tanto, la ausencia del MHC propio en la superficie de una célula desencadena el ataque por la célula asesina. Ahora bien, ¿en qué circunstancias observamos la pérdida de moléculas de histocompatibilidad? Según lo arriba expuesto, los linfocitos *T* citotóxicos requieren la presencia del MHC para lisar



Mecanismo de acción de las células asesinas (NK)

la célula diana. En su estrategia para escapar del ataque linfocítico, algunos virus al infectar una célula secuestran de forma selectiva las moléculas de histocompatibilidad; esa es la razón de que no aparezcan ya en superficie. Hay también células tumorales que reducen o eliminan del todo la expresión del MHC en superficie. En consecuencia, los linfocitos *T* son incapaces de reconocer esas células. Sin embargo, ahora sabemos que esas células pasan a ser el objeto de ataque de las células NK, que detectan la ausencia del MHC. En este sentido, las células NK pueden considerarse un sistema complementario de los linfocitos *T*, pues detectan y lisan células que escaparían al reconocimiento por linfocitos *T*.

La pugna entre el sistema inmunitario y el virus no termina ahí. Algunos virus escapan de las células NK empleando a tal fin una doble estrategia. Primero, y según lo dicho, secuestran las moléculas de histocompatibilidad propias de la célula infectada; gracias a ello, ésta pasa inadvertida al rastreo de los linfocitos *T*. Por otro lado, para huir de las células NK, reemplazan el verdadero MHC de la célula con una molécula de histocompatibilidad fraudulenta, capaz de interaccionar de forma inespecífica con varios receptores inhibidores de la célula NK.

Aunque el símil de la batalla resulta útil para describir el fenómeno, conviene recordar que los mecanismos que mejoran la adaptación de una especie a su entorno no son tácticos, sino producto del azar. Podemos utilizar el ejemplo de las células asesinas para ilustrar la influencia de la evolución de un organismo sobre la evolución del parásito, y viceversa. En la lucha por la supervivencia cada especie adquiere características que le permiten adaptarse mejor a su medio. La expresión de una molécula similar al MHC capaz de inhibir a las células NK podría parecer el producto de largos años de estudio por parte del virus, siendo así que sólo refleja el éxito en la adaptación. El conocimiento de este mecanismo de adaptación, además de permitirnos comprender mejor la biología del sistema inmunitario, nos ayuda a tomar parte activa para defendernos de nuestros agresores.

MAR VALÉS GÓMEZ
Universidad de Harvard

Catálisis heterogénea

Aplicaciones medioambientales

En 1835 Jöns Jacob Berzelius acuñó el término "catálisis" para designar la influencia de ciertas sustancias sobre la naturaleza de determinadas reacciones químicas; durante éstas, las sustancias no sufrían alteraciones. Hoy el catalizador ha pasado a considerarse un sistema abierto que intercambia materia con el fluido que lo rodea. La composición molecular del catalizador en el fluido cambia, mientras que su masa y su composición elemental permanecen constantes.

La escasez de materias primas, la limitación de los recursos energéticos y la preocupación por la regeneración del entorno convergen para destacar la importancia de los catalizadores heterogéneos en la industria química y petroquímica. (De un catalizador se dice que es heterogéneo cuando se encuentra en una fase diferente de los reaccionantes y productos.)

Las principales innovaciones registradas en la catálisis heterogénea conciernen al control de la emisión de contaminantes al medio y a la elaboración de procesos químicos más limpios. Se ha avanzado en el control de compuestos orgánicos volátiles (COV), control de emisiones de vehículos a motor, eliminación de gases nitrosos y emisiones de centrales eléctricas. La combustión catalítica de COV permite, además, ahorrar costes de combustible.

Catalizadores típicos son los óxidos metálicos. También, el platino o el paladio sobre alúmina o monolitos cerámicos. Los parámetros operacionales que deben controlarse en las reacciones son la temperatura, velocidad espacial, nivel y composición de los contaminantes, así como venenos o inhibidores.

En la Universidad de Murcia, en colaboración con el Instituto de Catálisis y Petroleoquímica del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Madrid), hemos venido estudiando a lo largo de cinco años el funcionamiento de las fábricas españolas de ácido nítrico. Nos hemos centrado en el proceso catalítico de oxidación del amoníaco a óxido nítrico, así como en el control de los residuos de metales preciosos que se escapan del lecho de reacción.

Todos los procesos comerciales que se basan en la reacción para la producción de ácido nítrico débil son muy similares en sus aspectos básicos, salvo en la presión de operación, parámetro decisivo para la oxidación del amoníaco y la absorción en agua del óxido nítrico resultante de aquélla.

En las plantas nacionales, los procesos más usados son los combinados de presión alta-alta (7-12 atmósferas en el convertidor catalítico) y media-alta (2,5-5 atmósferas). Aunque los primeros resultan ventajosos en plantas grandes, se privilegia la segunda combinación, principalmente debido a las menores pérdidas de metales preciosos y a las mejoras en la recuperación de los mismos.

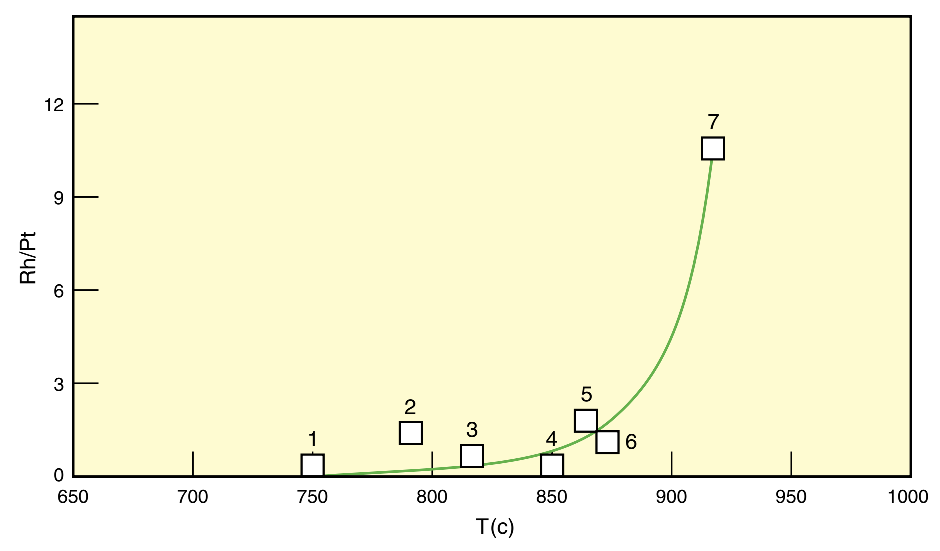
En cualquier planta, el reactor de amoníaco está constituido por una cestilla circular de acero inoxidable cuyo diámetro oscila entre 1 y 5 m, a tenor de la presión de operación. Dicha cestilla se cierra con una campana troncocónica unida al conducto de llegada de los gases de reacción. El lecho catalítico consta de un conjunto de telas de aleación de Pt-Rh, tejidas formando un dibujo de espina de pescado y dispuestas en círculos superpuestos y perpendiculares al flujo de gas. El número de telas y la colocación o no de un paquete recuperador de metales preciosos aguas abajo del reactor depende de la presión utilizada en el mismo. Las telas de captación están integradas por aleaciones de Pd-Cu o Pd-Ni.

El catalizador deseable presentará una selectividad extremadamente alta para la reacción principal de oxidación del amoníaco a óxido nítrico, posibilitando rendimientos en torno al 92-98 %, y lo más baja posible para la reacción secundaria de oxidación a nitrógeno, ya que el ácido nítrico se obtiene únicamente por absorción en agua del óxido nítrico.

En nuestra investigación tomábamos muestras de las telas catalíticas, antes y después de una campaña completa. Dado el gran tamaño de las cestillas, se diseñó un muestreo representativo de toda la tela. Este proceso se repitió durante un elevado número de campañas de fabricación y en todas las plantas de ácido nítrico del país. La duración de una campaña depende, al igual que el resto de variables de operación de la planta, de la presión de oxidación del amoníaco. Así, oscila desde los tres meses de una planta de alta presión, hasta seis meses en el caso de una planta de media.

La presión de operación afecta de manera espectacular a la pérdida de metales preciosos aguas abajo del reactor. Estas oscilan desde los 400 miligramos por tonelada de ácido nítrico producido en las plantas de alta presión, hasta los 20 miligramos por tonelada en las de presión atmosférica.

Descubrimos que el tipo de pretratamiento a que se someten las telas catalíticas antes de su colocación en el quemador es decisivo para el rendimiento de la reacción de oxidación del amoníaco. Para contrastarlo, hicimos trabajar al paquete catalítico en



Correlación de la relación Rh/Pt en la superficie obtenida como promedio de todas las telas que forman el paquete con la temperatura de operación del reactor. (1 = Puertollano; 2 = Tablada; 3 = Felguera; 4 = Valladolid; 5 = Sagunto; 6 = Avilés y 7 = Asur)

diversas condiciones: sin tratamiento previo o tras someterlo a distintos procesos físicos y químicos. Aunque la actividad catalítica inicial difiere de un caso a otro, para alcanzar el nivel óptimo de partida es imprescindible someter las telas a algún proceso que posibilite su activación. En nuestro caso, fue un lavado con disolventes orgánicos y posterior encendido en antorcha de hidrógeno.

Recurrimos a la microscopía electrónica de barrido y la espectroscopía fotoelectrónica de rayos X para mostrar que una tela catalítica "fresca" activada en estas condiciones queda enriquecida en platino y desprovista de óxidos en la superficie. En el enriquecimiento superficial en platino se esconde la razón del aumento de actividad catalítica al principio del proceso. Este resultado permite establecer un protocolo de tratamiento y almacenamiento de los paquetes catalíticos antes de su colocación en el reactor.

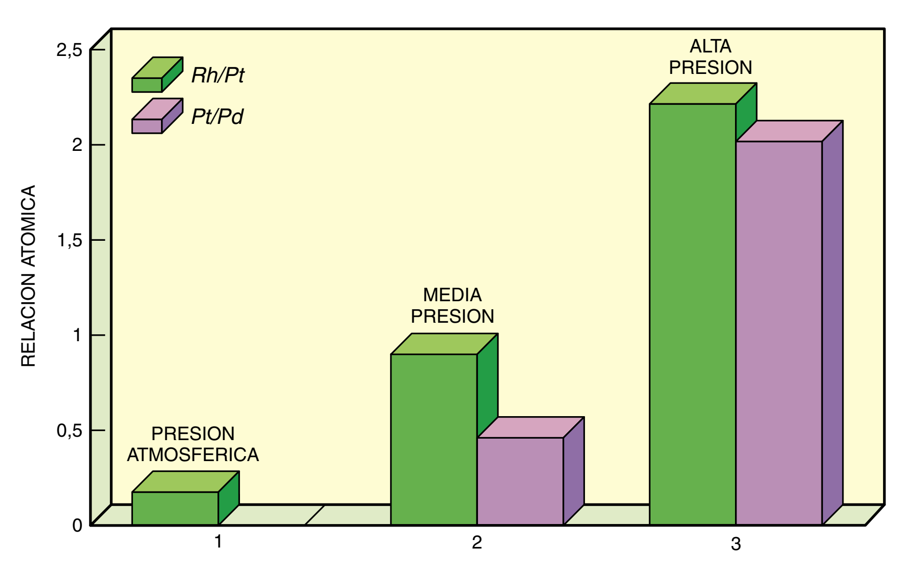
El análisis de las muestras usadas explicaba la actividad de una planta de ácido nítrico en función de la presión de operación en el reactor. En las plantas de alta presión se pierde la actividad catalítica de las telas de Pt-Rh por un mecanismo de ataque en las fisuras existentes en los límites de grano de los hilos. El metal se evapora en estas zonas como PtO_2, originando un enriquecimiento en Rh_2O_3, que es inactivo catalíticamente. Este proceso transforma los hilos lisos iniciales en otros rugosos, frágiles y menos pesados, ya desactivados. La estructura de dichos hilos está formada por dos envolturas concéntricas de Rh_2O_3 de diferente grosor y porosidad, que rodean a un núcleo con la composición inicial del catalizador. El funcionamiento de las telas recuperadoras se basa en la formación de una aleación en estado sólido entre el paladio de las mismas y el platino proveniente de las telas catalíticas situadas encima.

En las plantas de baja presión existe un menor poder oxidante de la mezcla gaseosa, debido a una menor presión parcial de oxígeno y a la inferior temperatura. De aquí se desprende que la mayor parte del proceso catalítico y de recuperación ocurre en estado metálico: la desactivación se asocia a un enriquecimiento en rodio de la superficie, menos activo que el platino.

Importa acotar las zonas de deposición preferencial —aguas abajo del reactor— de los óxidos de rodio, platino y paladio volatilizados de las telas catalíticas y recuperadoras en las plantas de alta presión. De acuerdo con nuestros datos, en los intercambiadores de calor condensaron la mayoría de los óxidos de platino y paladio, mientras que el filtro de platino acumuló una gran variedad de impurezas. Procedían éstas de una contaminación exterior a la planta (hierro, azufre, silicio, calcio, magnesio, cinc y plomo) y de una contaminación interior de la planta (hierro, cromo, níquel, cobre y manganeso).

¿Qué decir de la contaminación producida por los compuestos de azufre? El sulfuro de hidrogeno es un gas altamente tóxico, con efectos directos sobre la población; concentraciones de 700 ppm tienen efectos irreversibles sobre las vías respiratorias. Por combustión, forma óxidos de azufre y sulfúrico, causantes de la lluvia ácida. La presencia de compuestos de azufre en combustibles es especialmente grave, debido a que generan una alta contaminación en las ciudades (vehículos a motor, calefacciones, etcétera). De esta forma, la normativa de limitación de azufre en dichos combustibles es cada vez más estricta y las refinerías generan cantidades crecientes de H_2S, consecuencia de desulfuraciones cada vez más profundas. La forma "tradicional" de eliminación de H_2S es su incineración a SO_2, que es menos corrosivo, aunque el impacto medioambiental (lluvia ácida) es todavía muy importante. La solución más utilizada comercialmente es la aplicación del proceso Claus, el cual permite convertir el sulfuro de hidrógeno en azufre elemental, que ya no es tóxico. El proceso Claus actual consta de dos etapas. La primera de ellas no es catalítica y en la misma 1/3 del H_2S disponible se quema con aire. La segunda etapa es catalítica, y en ella el SO_2 formado reacciona con los 2/3 restantes del H_2S, sobre catalizadores del tipo alúmina, siendo el azufre condensado posteriormente para su recuperación.

Nuestro grupo ha trabajado en un proyecto que tiene como objetivo la eliminación del SO_2 de efluentes gaseosos mediante la reacción de Claus a baja temperatura. Para ello, se ensayaron en reactores de laboratorio catalizadores tales como γ-Al_2O_3, zeolitas, sepiolitas y otros. La actividad catalítica de estos materiales depende principalmente de las propiedades dadoras de electrones de la superficie, aunque también les afectan las propiedades texturales. Trabajando a temperaturas inferiores al punto de fusión del azufre, se consiguen altas conversiones de SO_2, pero simultáneamente tiene lugar una deposición de azufre sólido que podría desactivar el catalizador. Se ha estudiado por tanto, el efecto del azufre depositado sobre la actividad catalítica de distintos materiales y su distribución a través del lecho catalítico. Con este fin se hace uso de técnicas específicas para química de superficies: espectroscopía fotoelectrónica de rayos X, microscopía electrónica de barrido para estudios morfológicos, desorción térmica programada y otras.



Comparación de plantas

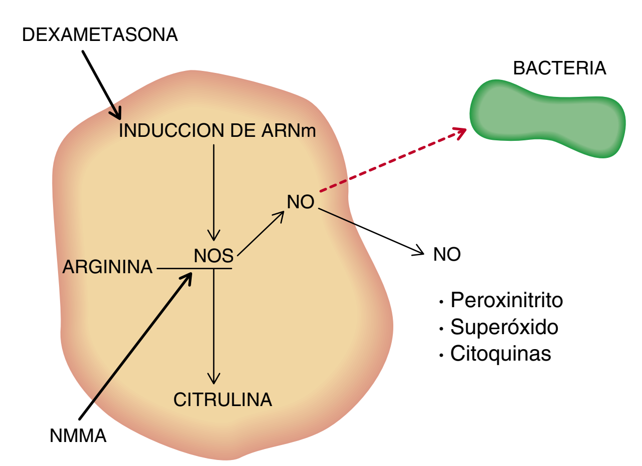
F. TOMÁS ALONSO
Departamento de ingeniería química
Cartagena
Universidad de Murcia

Inflamación

Papel del óxido nítrico

El óxido nítrico (NO), un radical libre, forma parte de la contaminación ambiental. Se encuentra también en el organismo animal. Es producido a partir del aminoácido L-arginina por medio de la óxido nítrico sintasa. Esta enzima se presenta en tres isoformas: endotelial, neuronal e inducible. La óxido nítrico sintasa endotelial (NOSe) se halla en las células endoteliales de los vasos sanguíneos. La isoforma neuronal (NOSn) se encuentra en el sistema nervioso; se considera, lo mismo que la anterior, constitutiva. Por último, la isoforma inducible (NOSi) está presente en macrófagos y en otras células del sistema inmunitario, como leucocitos, polimorfonucleares, monocitos, etcétera.

La enzima inducible se regula por transcripción, lo que significa que requiere una nueva síntesis de ARNm. Dicha síntesis de ARN mensajero es inducida por lipopolisacáridos, exotoxinas y otros productos bacterianos; pero también la instan citoquinas inflamatorias, como muchas interleuquinas. Una vez inducida, la NOSi se mantiene activa por un período de 4 a 24 horas con la consiguiente producción de óxido nítrico en grandes cantidades. Las isoformas constitutivas fabrican sólo pequeñas cantidades de NO que son utilizadas en la vasodilatación y neurotransmisión.



El óxido nítrico (NO) se forma a partir de L-arginina. Por medio de la óxido nítrico sintasa (NOS) el aminoácido produce L-citrulina y óxido nítrico. La acción de la enzima puede bloquearse mediante los compuestos NMMA y dexametosona

El óxido nítrico liberado durante los procesos inflamatorios puede ejercer acciones proinflamatorias y antiinflamatorias. El que opere un efecto u otro dependerá del tipo y fase de la inflamación, así como también de respuestas vasculares y celulares. Además, el NO generado puede unirse al anión superóxido para formar peroxinitritos. Es conocido que el peroxinitrito es un oxidante muy poderoso y sumamente tóxico; se lo señala como el responsable principal de la inactivación bacteriana y de la citotoxicidad celular.

Por otro lado, es conocido que el NO activa la guanilato ciclasa. La movilización de esta enzima aumentaría la síntesis de guanosina monofosfato cíclico (GMPc), metabolito que media muchas de las funciones del NO (por ejemplo, la relajación muscular). En la inflamación sistémica se produce una gran vasodilatación con la consiguiente hipotensión que se observa en el choque séptico, resultado quizá de una infección sistémica.

Conocido lo anterior, entenderemos por qué se han estudiado en animales de experimentación los efectos de L-NMMA (NG-monometil-L-arginina), un inhibidor de la NOS, con el fin de revertir la hipotensión que es muchas veces refractaria al tratamiento con los vasoconstrictores clásicos. También se ensayó la eficacia de dexametasona contra la inflamación sistémica de origen bacteriano. Se pudo comprobar que esta substancia inhibía la inducción de la NOSi, con la consiguiente disminución de la cantidad de NO liberado y reversión del cuadro clínico. En estudios piloto que se están realizando en humanos afectados de choque séptico, se ha observado que efectivamente los inhibidores de la óxido nítrico sintasa tienen un efecto drástico en la reversión de la hipotensión de este cuadro.

Dado que el NO forma nitritos y otros compuestos estables que se encuentran aumentados en el suero y en el líquido cefalorraquídeo de animales inyectados con lipopolisacáridos, creemos que la medición de los niveles de nitritos y nitratos en diversas inflamaciones generales constituiría un criterio clínico importante para evaluar situaciones patológicas y los resultados de diversos tratamientos.

GRISELDA CANTEROS
Centro de Estudios Farmacológicos y Botánicos. Buenos Aires

Especies amenazadas

Almacenamiento in vitro

La conservación de especies en peligro de extinción constituye uno de los puntos prioritarios de cualquier programa de conservación de la biodiversidad. El procedimiento más idóneo para afrontar la conservación de una especie amenazada consiste en tomar las medidas necesarias para preservar los ecosistemas a los que pertenece, y en eliminar las causas que ponen en peligro su existencia. Pero esas medidas preventivas llegan tarde si el ecosistema sufre una degradación irreversible o no hay forma de acabar con el agente causante de la alteración.

Ciñéndonos al mundo vegetal, la conservación *ex situ* de germoplasma (genotipo o conjunto de caracteres hereditarios de la especie en cuestión) de especies amenazadas constituye un complemento esencial de las intervenciones *in situ* (en su medio).

El método más económico y eficaz para la conservación *ex situ* de germoplasma vegetal consiste en el almacenamiento de semillas en cámaras a bajas temperaturas y con un bajo contenido en humedad. Bajo la iniciativa del profesor César Gómez Campo, el Departamento de Biología Vegetal de la Universidad Politécnica de Madrid lleva más de 25 años dedicado a la conservación de semillas de especies vegetales amenazadas de la península Ibérica y de todo el área mediterránea. Desde 1988 seguimos una línea de diversificación de técnicas de conservación *ex situ* basadas en la utilización de técnicas de cultivo *in vitro*.

La aplicación de las técnicas de cultivo *in vitro* constituye una opción alternativa a la conservación de semillas, cuando ésta presenta problemas. En efecto, a veces, las semillas pierden su viabilidad al almacenarse en condiciones de baja temperatura y humedad (semillas recalcitrantes). En otras ocasiones, el almacenamiento y la propagación por semilla

resulta poco eficaz, debido a la presencia de dormición en las semillas, afecciones patógenas o parasitarias y requerimientos muy específicos para la germinación. Finalmente, existen casos extremos en los que la especie no produce semillas viables (e.g. *Centaurea lainzii*, especie triploide), o las produce en tal pequeña cantidad que la recolección de una muestra para su conservación *ex situ* podría perjudicar la dinámica poblacional de la especie. Bajo el apelativo de caso extremo podemos igualmente incluir aquel en que el número de individuos es sumamente bajo, encontrándose situaciones de especies de las que se conoce un solo individuo.

Las técnicas de cultivo *in vitro* pueden utilizarse en la conservación *ex situ* con múltiples finalidades. La micropropagación permite obtener un elevadísimo número de individuos a partir de un material inicial escaso. Partiendo de explantos tomados a plantas madre, se establece, en primer lugar, el cultivo bajo condiciones de asepsia, sobre un medio nutritivo de composición conocida y en condiciones ambientales controladas. Mediante la utilización de distintos medios nutritivos el cultivo pasa por las fases de multiplicación de brotes, elongación de tallos y enraizamiento. Tras superar una última fase de aclimatación a condiciones *ex vitro*, las plantas regeneradas se transfieren al invernadero.

Los individuos obtenidos pueden destinarse a nuevos estudios sobre la especie, distribuirse en jardines botánicos para el mantenimiento de colecciones de campo o utilizarse como material de reintroducción. Así, en nuestra unidad de cultivo *in vitro* se ha logrado micropropagar numerosas especies españolas en peligro de extinción tales como *Antirrhinum microphyllum*, *Centaurium rigualii*, *Coronopus navasii*, *Helianthemum polygonoides*, *Lavatera oblongifolia*, *Limonium calaminare*, *L. duforei*, *L. estevei* y *L. gibertii*.

También podemos optar por almacenar cultivos bajo condiciones de crecimiento limitado. Los métodos utilizados en micropropagación exigen que cada 20-40 días los cultivos se transfieran a un nuevo recipiente con medio nutritivo fresco. Mediante los cultivos bajo condiciones de crecimiento limitado resulta posible mantener la viabilidad de los explantos por períodos de seis meses a dos años, según los casos, sin necesidad de repicado. En nuestros ensayos con *Antirrhinum microphyllum*, *Centaurium rigualii*, *Coronopus navasii*, *Lavatera oblongifolia*, *Limonium calaminare*, *L. duforei*, *L. estevei* y *L. gibertii* las limitaciones al crecimiento se han impuesto mediante el empleo de bajas temperaturas (5 ºC), oscuridad y bajo contenido en sacarosa en el medio de cultivo.



Micropropagación de Lavatera oblongifolia*. Etapa de elongación del tallo*

Un procedimiento de almacenamiento a más largo plazo consiste en la crioconservación en nitrógeno líquido (–196 ºC) de explantos cultivados *in vitro*. A esa temperatura, el metabolismo de los explantos se encuentra totalmente paralizado y, en principio, resulta posible mantener su viabilidad de forma indefinida. Los explantos requieren una serie de pretratamientos para que superen sin sufrir daños los procesos de congelación y descongelación. La encapsulación de yemas de *Centaurium rigualii* y de *A. microphyllum* en cuentas de alginato y su posterior desecación ha permitido obtener elevados índices de supervivencia tras la crioconservación.



Explanto de Coronopus navasii *tras 6 meses de almacenamiento a cinco grados C y en oscuridad*

Un aspecto a tener presente en la utilización de estas técnicas es la aparición de variación somaclonal, fenómeno que estriba en la manifestación de alteraciones genéticas originadas durante el cultivo. A menudo, esta variación no se detecta en la morfología y resulta necesario recurrir a análisis isoenzimáticos o de ADN.

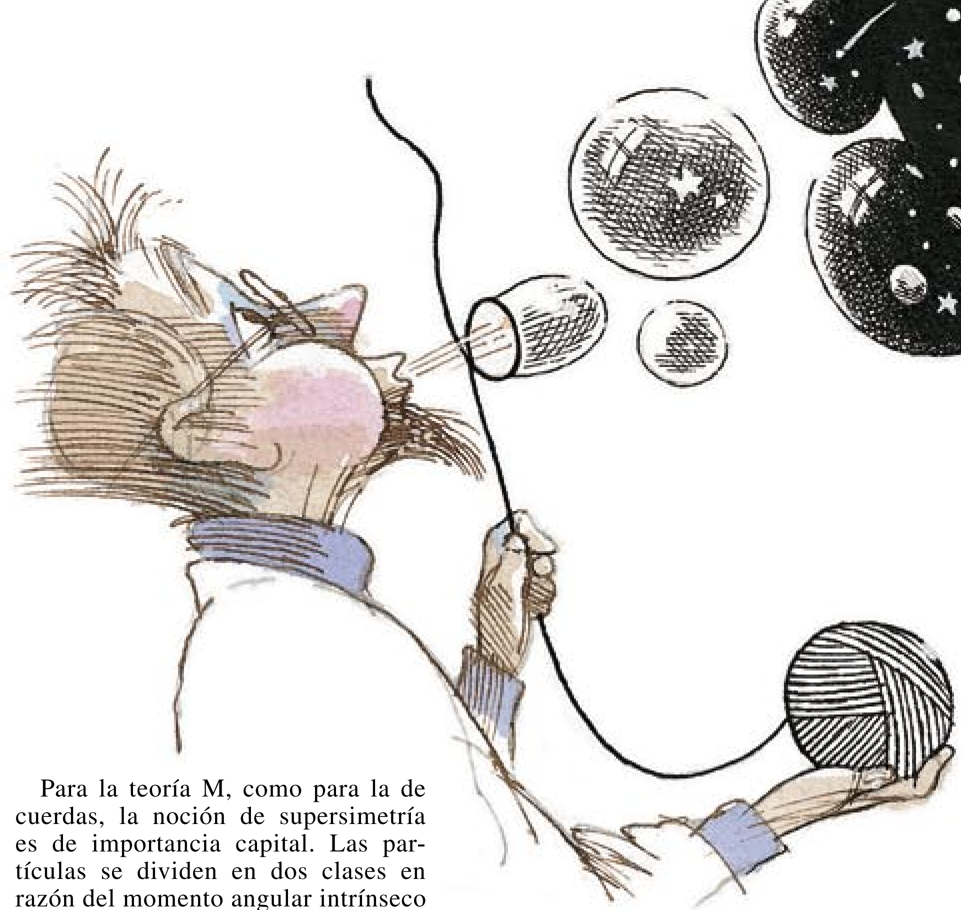
Hay que procurar que la incidencia de la variación somaclonal sea mínima. Esto se puede conseguir utilizando vías de micropropagación que utilicen siempre yemas o meristemos preformados y eviten la formación de callo. El uso de reguladores de crecimiento en cantidades mínimas y la regulación adecuada de las condiciones ambientales puede también contribuir a minimizar la incidencia de la variación somaclonal. La realización de recuentos cromosómicos y de estudios isoenzimáticos y de ADN en el material regenerado permite evaluar la incidencia de la variación somaclonal y eliminar las variantes cuando se estime necesario.

José María Iriondo Alegría,
Carmen Martín Fernández,
Elena González Benito
y César Pérez Ruiz
Universidad Politécnica de Madrid

La teoría M

Va perfilándose una teoría del todo en la que intervienen cuerdas, membranas y agujeros negros

Michael J. Duff



Ahora que ciertos oráculos predicen el final de la ciencia porque todos los descubrimientos importantes ya están hechos, merece la pena recordar que los dos pilares principales de la física del siglo veinte, la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad general, son mutuamente incompatibles.

La relatividad general no satisface las reglas cuánticas por las que se rigen las partículas elementales. En el extremo contrario de la escala de magnitudes, los agujeros negros ponen en entredicho los fundamentos mismos de la mecánica cuántica. La física tiene que hallar una solución. Más que plegarse a un futuro sombrío, de rendimientos decrecientes, hay que apostar por una nueva revolución.

Hasta hace poco la mayor esperanza de una teoría que unificase la gravedad y la mecánica cuántica y describiera todos los fenómenos físicos venía de las cuerdas, objetos unidimensionales cuyos modos de vibración representan las partículas elementales. Pero en los dos últimos años las cuerdas han quedado absorbidas en la teoría M. Como dice el máximo exponente de la teoría de cuerdas, Edward Witten, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, "esa M significa, según los gustos, magia, misterio o membrana". Cada día salen pruebas nuevas en favor de esta teoría. Desde la irrupción de las cuerdas no se había registrado tanto despliegue teórico.

MICHAEL J. DUFF investiga las teorías unificadas de las partículas elementales, la gravedad cuántica, la supergravedad, las supercuerdas, las supermembranas y la teoría M. Desde 1992 es "profesor distinguido" de la Universidad A&M de Texas.

Para la teoría M, como para la de cuerdas, la noción de supersimetría es de importancia capital. Las partículas se dividen en dos clases en razón del momento angular intrínseco o "espín". La supersimetría dicta que, para cada partícula conocida de espín entero —0, 1, 2, etc., medido en unidades cuánticas—, haya una partícula de la misma masa y espín semientero —$^1/_2$, $^3/_2$, $^5/_2$, etc.— y viceversa.

Por desgracia no se ha encontrado todavía ninguno de esos supercompañeros. Ha de romperse esa simetría, si es que existe, para que las partículas propuestas no tengan las mismas masas que las conocidas, sino que presenten una masa excesiva y no se dejen ver en los actuales aceleradores. Aun así los teóricos han seguido creyendo en la supersimetría por la razón potísima de que, gracias a ese armazón, llegarán a unificarse las interacciones débiles, electromagnéticas y fuertes con la más recalcitrante de todas: la gravedad.

La supersimetría transforma las coordenadas del espacio y del tiempo de manera que las leyes físicas sean las mismas para todos los observadores. La teoría general de la relatividad de Einstein arranca de esta condición; de la supersimetría se sigue, pues, la gravedad, o más bien la "supergravedad", en la cual transmite las interacciones gravitatorias una partícula de espín 2 —el gravitón— que tiene como compañero al gravitino, de espín $^3/_2$.

La gravedad corriente no pone límites a las dimensiones posibles del espacio-tiempo: sus ecuaciones pueden, en principio, formularse en cualquier dimensión. No pasa esto con la supergravedad, que pone una cota superior, 11, al número de dimensiones del espacio-tiempo. El universo que nos es familiar tiene tres dimensiones espaciales, la altura, la longitud y la anchura, que con la temporal hacen las cuatro del espa-



1. LA VIDA, EL UNIVERSO, TODO podría emerger de la interrelación entre cuerdas, burbujas y hojas en unas dimensiones del espacio-tiempo superiores.

cio-tiempo. Pero a principios de los años veinte Theodor Kaluza y Oskar Klein sugirieron que el espacio-tiempo podría tener una quinta dimensión oculta. No sería infinita como las otras, sino que se cerraría sobre sí misma y formaría un circunferencia donde podrían residir ondas cuánticas, que la ceñirían perfectamente. En la circunferencia sólo caben números enteros de ondas; cada uno correspondería a una partícula con una energía diferente; por tanto, las energías serían discretas, en el sentido de que estarían "cuantizadas".

Pero un observador que viviese en las otras cuatro dimensiones vería un conjunto de partículas, no con energías, sino con cargas cuantizadas. El cuanto de carga —la unidad— dependería del radio del círculo. También en el mundo real está la carga eléctrica cuantizada, en unidades de *e*, la carga del electrón. Para obtener el valor correcto de *e* el círculo tendría que ser minúsculo, de unos 10^{-33} centímetros de radio.

El tamaño de la dimensión, invisible en su exigüidad, explica por qué a las personas, o los átomos incluso, se les escapa su existencia. Aun así nos daría el electromagnetismo, con el cual la gravedad, ya presente en el mundo tetradimensional, se unificaría.

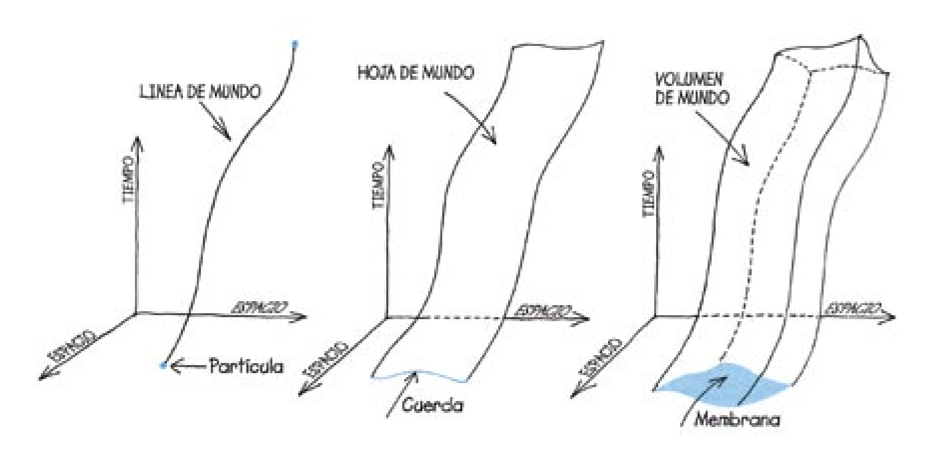
En 1978 Eugene Cremmer, Bernard Julia y Joel Scherk comprendieron que la supergravedad no sólo permite hasta siete dimensiones adicionales, sino que es más elegante en un espacio-tiempo de 11 dimensiones (10 de espacio y una de tiempo). El tipo de mundo real, de cuatro dimensiones, definido finalmente por la teoría dependerá de cómo se enrollen, a la manera de Kaluza y Klein, las dimensiones extra. Con varias dimensiones cerradas sobre sí mismas podrían en principio derivarse, además del electromagnetismo, las fuerzas nucleares fuerte y débil. De ahí que los físicos empezaran a ver en la supergravedad de 11 dimensiones la esperanza de una teoría unificada.

Pero en 1984 la supergravedad de 11 dimensiones fue derribada sin contemplaciones de su pedestal. Una característica importante del mundo real es que la naturaleza distingue entre la derecha y la izquierda: las leyes que gobiernan la fuerza nuclear débil actúan de manera distinta cuando se las ve en un espejo. (El giro intrínseco, o espín, de los neutrinos, por ejemplo, siempre es levógiro.) Ahora bien, como Witten y otros recalcaron, no era fácil obtener esa quiralidad al reducir las 11 dimensiones a cuatro.

La teoría de supercuerdas en 10 dimensiones ocupó el puesto de la supergravedad. Para ser precisos, lo hicieron cinco teorías competidoras, denominadas, en razón de sus características matemáticas, de cuerdas heteróticas $E_8 \times E_8$, heteróticas SO(32), de tipo I SO(32), de tipo IIA y de tipo IIB. (Las cuerdas del tipo I son "abiertas", es decir, constan de sólo un segmento; las otras son "cerradas" y forman bucles.) Una cuerda en particular, la $E_8 \times E_8$, mostraba —al menos en principio— potencia suficiente para explicar las fuerzas y las partículas elementales conocidas, quiralidad incluida. A diferencia de la supergravedad, parecía, asimismo, que las cuerdas proporcionaban una teoría de la gravedad coherente con los fenómenos cuánticos. Con este cúmulo de virtudes la teoría de cuerdas dejó prendados a los físicos y mandó a la supergravedad de 11 dimensiones al desván.

Pero tras esa primera euforia con las cuerdas llegaron dudas inquietantes. De entrada, los problemas de cierta entidad —en especial el de cómo contrastar la teoría con experimentos— se escapaban a una resolución con los métodos tradicionales de cálculo. Demandaban técnicas radicalmente nuevas. En segundo lugar, ¿por qué había cinco teorías de cuerdas diferentes? A quien se afana por hallar una teoría del todo, semejante sobreabundancia le desconcierta. En tercer lugar, si la supersimetría permite 11 dimensiones, ¿por qué las supercuerdas se quedan en 10? Por último, puestos a asimilar partículas puntuales a cuerdas, ¿por qué no a membranas o, de una manera general a objetos de *p* dimensiones, a *p*-branas?

Así las cosas, y si se nos permite la metáfora, mientras la mayoría de los teóricos se atiborraba de superespaguetis un grupo restringido se las tenía con los superraviolis. Una partícula, que carece de dimensiones, describe en su movimiento por el espacio-tiempo una trayectoria unidimensional, o "línea de mundo". Una cuerda —que tiene una dimensión, la longitud— barre una "hoja de mundo" bidimensional; una membrana —que tiene dos, la longitud y la anchura— dibuja un "volumen de mundo" tridimensional. En general, una *p*-brana barre un volumen de mundo de $p+1$ dimensiones. (Ni que decir tiene que ha de haber sitio su-



2. LA TRAYECTORIA de una partícula en el espacio-tiempo describe una línea de mundo. A su vez, la de una cuerda o una membrana barre una hoja o un volumen de mundo, respectivamente.

ficiente para que la *p*-brana se mueva por el espacio-tiempo; $p+1$ no puede, pues, ser mayor que el número de dimensiones del espacio-tiempo.)

Ya en 1962 Paul M. Dirac construyó un imaginativo modelo que se basaba en una membrana. Planteó que el electrón no era un punto, sino una suerte de burbuja minúscula, una membrana cerrada sobre sí misma. Sus oscilaciones, sugirió, generarían otras partículas, entre ellas el muon, versión pesada del electrón. Aunque Dirac fracasó en su intento, las ecuaciones que formuló para la membrana son, en esencia, las que se usan todavía hoy. La membrana puede tomar la forma de una burbuja o extenderse en dos direcciones, a la manera de una plancha de caucho.

La supersimetría impone duras restricciones a las dimensiones posibles de las *p*-branas. En el espacio-tiempo de 11 dimensiones flota una membrana; la descubrieron, por vía matemática, Eric Bergshoeff, Ergin Sezgin y Paul K. Townsend. Sólo tiene dos dimensiones espaciales y es como una hoja. Paul S. Howe, Takeo Inami, Kellog Stelle y el autor mostraron que, si una de las 11 dimensiones era una circunferencia, podíamos envolverla con la membrana una vez y pegando los bordes formar un tubo. Si el radio de la circunferencia decrece en cuantía suficiente, la membrana enrollada acabará pareciendo una cuerda en 10 dimensiones, en concreto la supercuerda del tipo IIA.

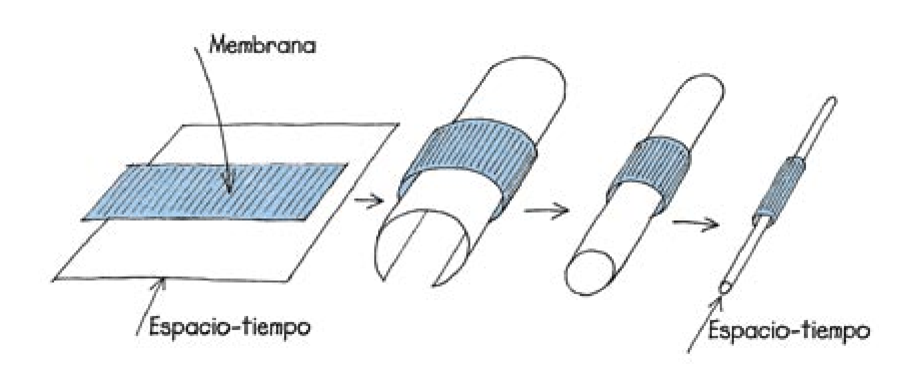
Pese a estos resultados los teóricos de las cuerdas prestaron escasa atención al proyecto de las membranas. Por suerte, las cosas estaban a punto de cambiar gracias a un avance en un campo muy alejado. Amalie Emmy Noether había demostrado en 1917 que la masa, la carga y otras propiedades de las partículas elementales se conservaban gracias a alguna simetría. La conservación de la energía, por ejemplo, se sigue de que se suponga que las leyes de la física no cambian con el tiempo, o que son simétricas bajo el paso del tiempo; la de la carga eléctrica es consecuencia de una simetría de la función de ondas de la partícula.

Pero a veces las propiedades podrían conservarse merced a las deformaciones de los campos. A estas leyes de conservación se las llama topológicas porque la topología es la rama de la matemática que se ocupa de la forma de las cosas. Cabría, por ejemplo, que un nudo de un conjunto de líneas del campo, un solitón, no pudiera deshacerse: el solitón no se disipará y se portará de forma muy parecida a una partícula. Un ejemplo clásico es el monopolo magnético —un polo de imán suelto—, que, si bien no se ha hallado en la naturaleza, aparece como una configuración retorcida en algunas teorías de campos.

De acuerdo con el esquema tradicional, las partículas que portan cargas de Noether, así los electrones y los quarks, se reputan fundamentales; derivadas, las que portan cargas topológicas. Los monopolos magnéticos pertenecen a la segunda categoría. Pero Claus Montonen y David I. Olive hicieron en 1977 una conjetura atrevida. ¿No habría una formulación alternativa de la física en la que los papeles de las cargas de Noether (como la eléctrica) y las cargas topológicas (como la magnética) estuviesen cambiados? En esa imagen "dual" los monopolos magnéticos serían los objetos elementales y las partículas corrientes —los quarks, los electrones y demás— solitones.

Para ser más precisos, una partícula fundamental de carga *e* sería equivalente a una partícula solitónica de carga *1/e*. Puesto que la carga de una partícula mide la intensidad con que interactúa, un monopolo lo haría débilmente cuando la partícula original lo hiciese con fuerza (es decir, siendo *e* grande) y viceversa.

De ser cierta, la conjetura llevaría a una profunda simplificación matemática. En la teoría de los quarks, apenas si se pueden hacer cálculos cuando los quarks interccionan fuertemente; pero los monopolos deben entonces interaccionar débilmente. Cabría imaginar la ejecución de los cálculos con una teoría dual basada en los monopolos con lo que automáticamente se obtuvieran todas las soluciones para los quarks: la teoría dual daría los mismos resultados fi-



3. CONTRACCION simultánea de una membrana y de una dimensión del espacio-tiempo para dar una cuerda. Conforme el espacio donde yace —ilustrado aquí en forma de lámina bidimensional— se enrolla en un cilindro, la membrana va envolviéndolo. La dimensión enrollada se convierte en una circunferencia tan pequeña, que el espacio bidimensional acaba pareciendo unidimensional, una línea. La membrana que la envuelve ceñidamente se asemeja entonces a una cuerda.



4. UNA DIMENSION EXTRA enrollada como un tubo nos franquea la entrada en la fábrica de espacio-tiempo.

nales. Una idea que, por desgracia, quedó postergada. Era un problema del huevo y la gallina. Una vez demostrada, la conjetura de Montonen-Olive pasaría por encima de las técnicas corrientes de cálculo, pero antes había que demostrarla con algún otro método.

Las *p*-branas pueden también asimilarse a los solitones. Andrew Strominger halló en 1990 que una cuerda en 10 dimensiones puede dar un solitón que es una pentabrana. Strominger sugirió, dando nueva vida a una conjetura mía anterior, que una cuerda que interacciona fuertemente es el equivalente dual de unas pentabranas con una interacción débil.

Dos obstáculos importantes se oponían a esta dualidad. Primero, no se había demostrado todavía la dualidad propuesta por Montonen y Olive entre la electricidad y el magnetismo en las cuatro dimensiones ordinarias; resultaba, pues, más frágil aún la dualidad entre las cuerdas y las pentabranas en 10 dimensiones. En segundo lugar, nadie se ponía de acuerdo en el método de hallar las propiedades cuánticas de las pentabranas y, por tanto, en cómo probar la nueva dualidad.

Ashoke Sen acabó con el primer obstáculo al establecer que las teorías supersimétricas requerían la existencia de ciertos solitones dotados de carga eléctrica y magnética. La conjetura de Montonen-Olive había predicho la existencia de esos objetos. Ese resultado que tan poco llamativo parecía convirtió a muchos escépticos y desencadenó un cascada de artículos. Inspiró en particular a Nathan Seiberg y a Edward Witten. Ambos empezaron a buscar la dualidad en versiones más realistas (todavía supersimétricas) de la teoría de los quarks y aportaron un caudal de información sobre los campos cuánticos de un tipo inconcebible pocos años antes.

Varios teóricos generalizaron en 1990 la idea de la dualidad de Montonen-Olive para las supercuerdas en cuatro dimensiones, en cuyo dominio la idea encaja con mayor soltura. Esta dualidad, mera conjetura pese a todo, responde al nombre de dualidad S.

La verdad era que los teóricos de las cuerdas se habían acostumbrado a una forma de dualidad distinta. La dualidad T, así se llama, relaciona los dos tipos de partículas que se producen cuando una cuerda forma un bucle en torno a una dimensión compacta. Un tipo de las mismas (denominémoslas partículas “vibrantes”) son análogas a las predichas por Kaluza y Klein y proceden de las vibraciones de la cuerda que ciñe a la dimensión. Tendrán más energía si el círculo es pequeño. La cuerda puede además dar muchas vueltas alrededor del círculo, como una goma elástica a la muñeca de una mano; cuantas más veces lo haga y mayor sea el círculo, mayor será su energía. Cada nivel de energía representa además una partícula nueva (llamémoslas partículas de “arrollamiento”).

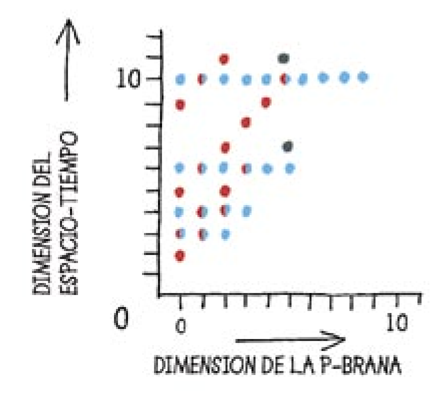
La dualidad T dice que, para una circunferencia de radio R, las partículas de arrollamiento son las mismas que las “vibrantes” para un círculo de radio $1/R$, y viceversa. El físico no distingue entre ambos conjuntos de partículas: una dimensión compacta gruesa da aparentemente las mismas partículas que una delgada.

Esta dualidad comporta una consecuencia profunda. Los físicos han luchado durante decenios por conocer la naturaleza de las escalas pequeñísimas, próximas a la longitud de Planck, 10^{-33} centímetros. Siempre han supuesto que, a distancias menores, las leyes de la naturaleza se desvanecen. Pero lo que la dualidad T nos dice es que a esas escalas y a las grandes el universo no parece distinto. Hasta podríamos imaginar que, si el universo hubiera de encogerse hasta ser menor que la longitud de Planck, se transformaría en un universo dual que crecería conforme el original se contrajese.

Sin embargo, la dualidad entre las cuerdas y las pentabranas seguía siendo sólo una conjetura; debíase ello al problema de la cuantización de las pentabranas. Mas, desde 1991 un equipo en el que participábamos Jianxin Lu, Ruben Minasian, Ramzi Khuri y yo resolvió el problema obviándolo. En efecto, si se enrollaban cuatro de las 10 dimensiones y las pentabranas las envolvían, éstas acababan constituidas en objetos unidimensionales, como cuerdas (solitónicas) en un espacio-tiempo de seis dimensiones. Además, una cuerda fundamental en 10 dimensiones retiene su carácter fundamental incluso en seis. De este modo, pues, la idea de una dualidad entre las cuerdas y las pentabranas daba paso a otra conjetura: la dualidad entre cuerdas solitónicas y fundamentales.

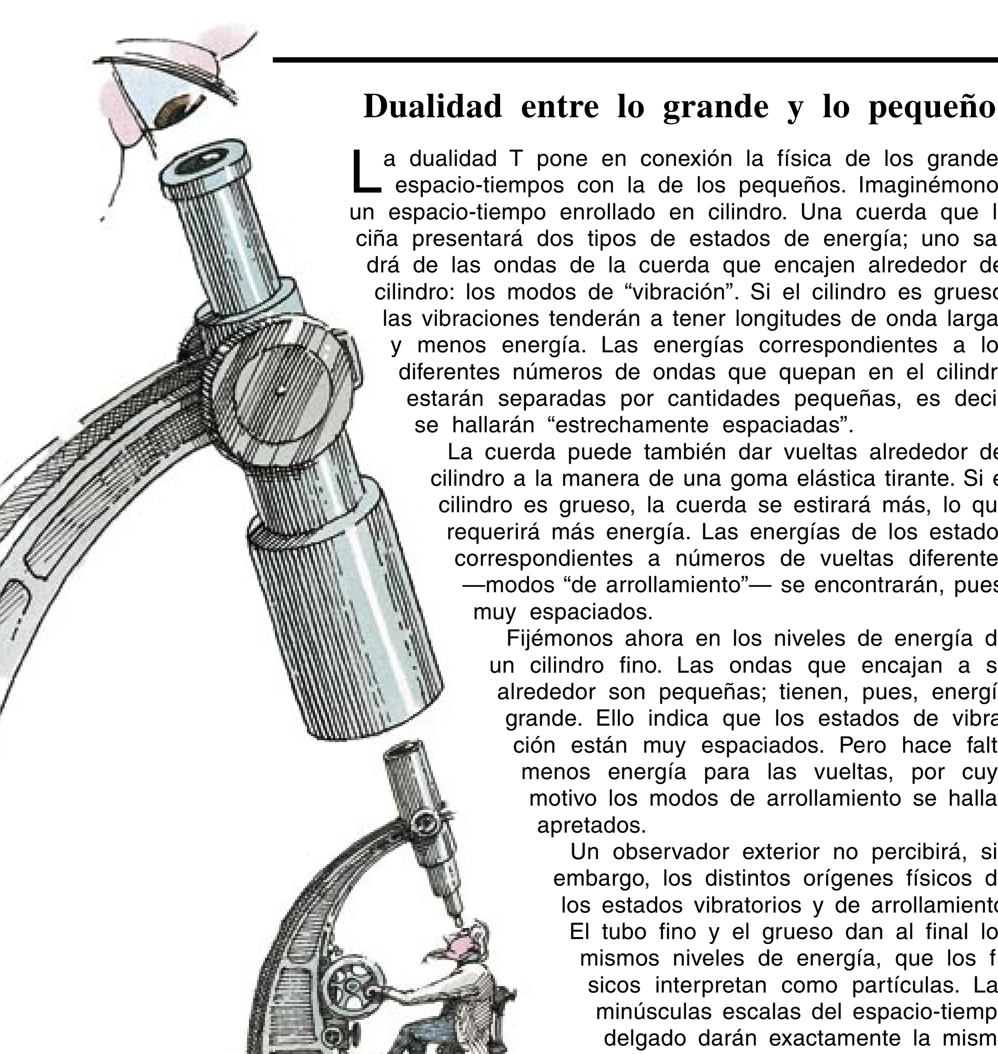
La ventaja era que sí sabíamos cuantizar una cuerda. Cabía, por tanto, contrastar las predicciones de la dualidad cuerda-cuerda. Podíamos demostrar, por ejemplo, que la intensidad con la que interaccionaban las cuerdas solitónicas venía dada por el inverso de la intensidad de la interacción de la cuerda fundamental, en completo acuerdo con la conjetura.

Christopher M. Hull apuntó, con Townsend, que una cuerda heterótica que interaccione débilmente podía incluso ser la dual de una cuerda del



5. ESTA TABLA DE “BRANAS” lista las membranas que se producen en espacio-tiempos de diferente número de dimensiones. Una *p*-brana de dimensión 0 es una partícula, una de dimensión 1 una cuerda y una de dimensión 2 una hoja o una burbuja. Algunas branas no tienen espín (*rojo*); las de Dirichlet tienen espín 1 (*azul*).

Dualidad entre lo grande y lo pequeño

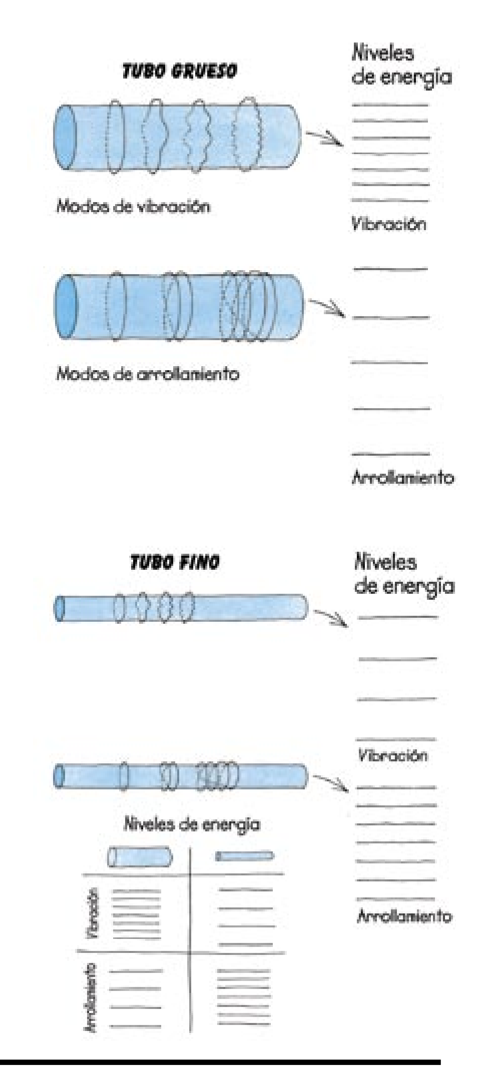


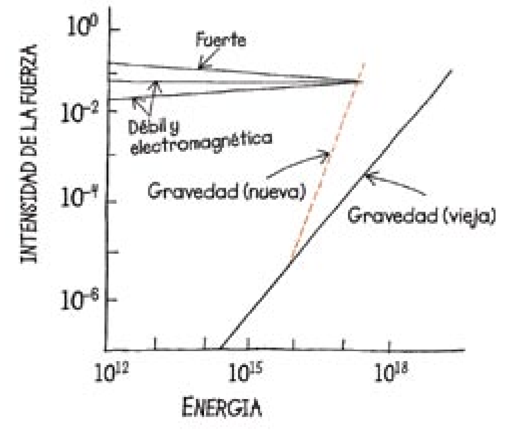
La dualidad T pone en conexión la física de los grandes espacio-tiempos con la de los pequeños. Imaginémonos un espacio-tiempo enrollado en cilindro. Una cuerda que lo ciña presentará dos tipos de estados de energía; uno saldrá de las ondas de la cuerda que encajen alrededor del cilindro: los modos de "vibración". Si el cilindro es grueso, las vibraciones tenderán a tener longitudes de onda largas y menos energía. Las energías correspondientes a los diferentes números de ondas que quepan en el cilindro estarán separadas por cantidades pequeñas, es decir, se hallarán "estrechamente espaciadas".

La cuerda puede también dar vueltas alrededor del cilindro a la manera de una goma elástica tirante. Si el cilindro es grueso, la cuerda se estirará más, lo que requerirá más energía. Las energías de los estados correspondientes a números de vueltas diferentes —modos "de arrollamiento"— se encontrarán, pues, muy espaciados.

Fijémonos ahora en los niveles de energía de un cilindro fino. Las ondas que encajan a su alrededor son pequeñas; tienen, pues, energía grande. Ello indica que los estados de vibración están muy espaciados. Pero hace falta menos energía para las vueltas, por cuyo motivo los modos de arrollamiento se hallan apretados.

Un observador exterior no percibirá, sin embargo, los distintos orígenes físicos de los estados vibratorios y de arrollamiento. El tubo fino y el grueso dan al final los mismos niveles de energía, que los físicos interpretan como partículas. Las minúsculas escalas del espacio-tiempo delgado darán exactamente la misma física que las grandes escalas de nuestro universo. —*M. J. D.*





6. LAS INTENSIDADES de las tres fuerzas convergen a un solo valor cuando la energía de las partículas es de 10^{16} gigaelectronvolt. Hasta ahora se creía que la gravedad no llegaba a ese punto de encuentro. Pero los cálculos que tienen en cuenta la undécima dimensión de la teoría M indican que es posible que la gravedad converja en ese punto.

tipo IIA que interaccione fuertemente, en el caso de que ambas estuvieran en seis dimensiones. Las barreras entre las diferentes teorías de cuerdas empezaban a cuartearse.

Se me ocurrió que la dualidad cuerda-cuerda rendía otro beneficio inesperado. Si reducimos el espacio-tiempo de seis dimensiones a cuatro enrollando dos, sucede que lo mismo la cuerda fundamental que la solitónica adquieren una dualidad T. Pero ahora viene el milagro: la dualidad T de la cuerda solitónica es precisamente la dualidad S de la cuerda fundamental, y viceversa. A este fenómeno —en el cual el intercambio de cargas en una de las imágenes es justo la inversión de la longitud en la imagen dual— se le llama dualidad de dualidades. Sitúa la dualidad S, hasta ahí conjetural, en una posición tan firme como la de la bien establecida dualidad T. Además, predice que la intensidad con la que interaccionan los objetos —sus cargas— está relacionada con el tamaño de las dimensiones invisibles. Lo que en un universo es carga puede en otro ser tamaño.

Witten, en una sonada disertación que dio en la Universidad del sur de California en 1995, puso de pronto todo lo hecho sobre las dualidades T, S y cuerda-cuerda bajo el techo de la teoría M en 11 dimensiones. En los meses siguientes aparecieron cientos, literalmente, de artículos en Internet que confirmaron que, sea lo que sea la teoría M, no cabía duda de que en ella las membranas desempeñan un papel importante.

Hasta la cuerda $E_8 \times E_8$, cuya quiralidad se creía era imposible de derivar de las 11 dimensiones, encontró un origen en la teoría M. Witten y Petr Horava revelaron el mecanismo por el que la dimensión extra de la teoría M se contraía a un segmento de línea. La imagen resultante consistía

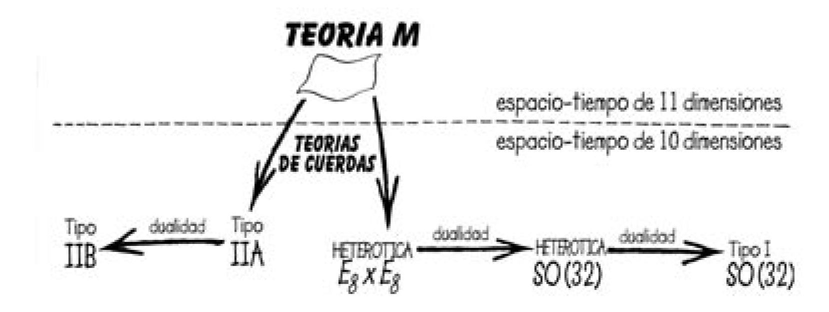
en dos universos de 10 dimensiones (cada uno en un extremo de la línea) conectados por un espacio-tiempo de 11 dimensiones. Las partículas —y las cuerdas— existen exclusivamente en los universos paralelos de los extremos, que pueden comunicarse entre sí a través de la gravedad. (Puede conjeturarse que toda la materia visible de nuestro universo está en una pared y la "materia oscura" que se cree explica la masa invisible del universo en la otra, en un universo paralelo.)

Este orden de cosas puede tener consecuencias importantes en la contrastación experimental de la teoría M. Se sabe, por ejemplo, que las intensidades intrínsecas de todas las fuerzas cambian con la energía de las partículas pertinentes. En las teorías supersimétricas se tiene que a una energía E de 10^{16} gigaelectronvolt las intensidades de las fuerzas fuerte, débil y electromagnética convergen. Además, esa intensidad de interacción es casi igual —pero no del todo— al número adimensional GE^2, donde G es la constante gravitatoria de Newton. Ese casi, que con mucha probabilidad no es una coincidencia, parece pedir una explicación; ha sido un motivo de gran frustración para los físicos.

En el peculiar espacio-tiempo concebido por Horava y Witten se puede elegir el tamaño de la undécima dimensión de manera que las cuatro fuerzas converjan en esa escala común. Es mucho menor que la energía de Planck, 10^{19} gigaelectronvolt, valor en que se esperaba antes que la gravedad se volviese fuerte. (La energía elevada está vinculada a las distancias pequeñas por medio de la mecánica cuántica. Así, la energía de Planck es simplemente la longitud de Planck expresada como energía.) En punto a energía, los fenómenos gravitatorios cuánticos podrían hallarse mucho más cerca de los sucesos diarios de lo que se ha estado creyendo, y esto tendría todo tipo de consecuencias cosmológicas.

En fecha reciente, Joseph Polchinski advertía el parecido entre algunas *p*-branas y cierta superficie descubierta en el siglo XIX por Peter G. L. Dirichlet. Branas que pueden asociarse a agujeros negros, a branas negras mejor: objetos de los que nada, ni la luz siquiera, puede escapar.

En este contexto, las cuerdas abiertas pueden considerarse cerradas con una parte oculta detrás de las branas negras. Tales planteamientos innovadores han llevado a una interpretación nueva de los agujeros negros definiéndolos como intersecciones de branas negras que envuelven siete dimensiones enrolladas. De ahí vienen fuertes indicios de que la teoría M podría incluso despejar las paradojas de los agujeros negros planteadas por Stephen W. Hawking.



7. LA TEORIA M en 11 dimensiones da lugar a las cinco teorías de cuerdas en 10 dimensiones. Cuando la dimensión adicional se enrolla y engendra un círculo, la teoría M genera la supercuerda de tipo IIA, que a su vez está relacionada por dualidad con la cuerda de tipo IIB. Pero si la dimensión adicional se contrae hasta devenir un segmento de línea, la teoría M se convierte en la cuerda heterótica E8×E8, conectada a las teorías de cuerdas SO(32) mediante dualidades.

Hawking mostró en 1974 que los agujeros negros no eran negros del todo; radian energía. Han de tener, pues, una entropía, que mide el desorden de un sistema contando el número de estados cuánticos disponibles. Pero el origen microscópico de estos estados cuánticos era un misterio. Strominger y Cumrun Vafa han contado gracias a la técnica de las membranas de Dirichlet el número de estados cuánticos de las branas negras y les ha salido una entropía que concuerda perfectamente con la predicción de Hawking. Es una nueva medalla para la teoría M.

Las branas negras prometen además resolver uno de los mayores problemas de la teoría de cuerdas: parece que hay miles de millones de formas diferentes de contraer 10 dimensiones en cuatro. Son, pues, muchas las predicciones enfrentadas sobre cómo opera el mundo real, o, lo que es lo mismo, no hay predicción que valga. Ahora bien, la masa de una membrana negra puede desaparecer si se contrae un agujero al que envuelva. Esto hace con el propio espacio-tiempo un número de magia: un espacio-tiempo dotado de cierto número de agujeros internos (una suerte de queso de Gruyère) se convierte en otro con un número de agujeros diferente, violando las leyes de la topología clásica.

Si todos los espacio-tiempos están relacionados de esta forma, dar con el bueno se vuelve un problema más domeñable. La cuerda puede elegir finalmente el espacio-tiempo que tenga, digamos, la energía menor y habitar en él. Sus ondulaciones producirán entonces las partículas elementales y las fuerzas que conocemos, es decir, el mundo real.

Pese a todos estos éxitos, hasta ahora sólo se han vislumbrado pequeños rincones de la teoría M; carecemos de una vista general. Hace poco Thomas Banks y Stephen H. Shenker, junto con Willy Fischler y Leonard Susskind, proponían una definición rigurosa de la teoría M. Su teoría "matricial" se basa en un número infinito de cerobranas (es decir, partículas). Las coordenadas, o posiciones, de estas partículas no son números corrientes, sino matrices que no conmutan (*xy* no es igual a *yx*). En este cuadro, el espacio-tiempo es un concepto borroso donde las coordenadas no se pueden definir con los números usuales, sino con matrices.

No es de hoy la sospecha de que la unificación de la gravedad —en otras palabras, la geometría del espacio-tiempo— con la física cuántica hará que el espacio-tiempo deje de estar bien definido, al menos mientras no se descubra una nueva definición. El enfoque matricial ha provocado mucho revuelo, pero no parece que tenga la última palabra. A lo largo de los próximos años esperamos descubrir qué es en realidad la teoría M.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EXPLICACIÓN DEL TODO. Madhusree Mukerjee en *Investigación y Ciencia*, marzo de 1996, págs. 70-77.

REFLECTIONS ON THE FATE OF SPACETIME. Edward Witten en *Physics Today*, vol. 49, núm. 4, págs. 24-30; abril de 1996.

DUALITY, SPACETIME AND QUANTUM MECHANICS. Edward Witten en *Physics Today*, vol. 50, núm. 5, págs. 28-33; mayo de 1997.



Sucedáneos de la sangre

Mary L. Nucci y Abraham Abuchowski

La escasez de donantes y los temores de posibles contaminaciones han dado un nuevo impulso a la investigación sobre opciones alternativas en el empeño por salvar vidas

Mediados los años ochenta, la palabra sangre empezó a provocar temor y recelo. La difusión de que el VIH —el virus de la inmunodeficiencia humana, causante del sida— se transmitía vía transfusión sembró el pánico y obligó a las instituciones sanitarias a introducir pruebas rigurosísimas en los bancos de sangre. Médicos de Francia y otros países sostenían la inocuidad de las transfusiones, pero una realidad trágica no tardó en desmentirlo. De ahí que perdure todavía el miedo. Aunque el riesgo de contagio con el virus del sida por transfusión oscile entre 1 de cada 450.000 y uno entre un millón, persiste la creencia de que cualquier sangre puede estar contaminada.

Esa fama, todo lo injustificada que se quiera, constituye uno de los principales problemas con que se enfrentan los bancos de sangre. Otro guarda relación con el suministro. En Estados Unidos, donde se precisa una transfusión cada tres segundos, el número de donantes de sangre sigue bajando: sólo el 5 por ciento de la población dona sangre, mientras crece sin cesar el grupo de personas que con mayor frecuencia requiere una transfusión, el de las personas de edad. Aunque los cálculos varían, parece que en el mundo hacen falta cada año 7,5 millones más de litros de sangre.

Se explica, pues, el apremio por hallar sucedáneos de la sangre. Desde los años cincuenta se venían explorando diversas posibilidades. Pero los esfuerzos se han redoblado desde que la FDA (la agencia norteamericana sobre control y vigilancia de alimentos y fármacos), el Instituto Nacional de la Salud y el Departamento de Defensa de los Estados Unidos mantuvieron reuniones en los años ochenta en las que se subrayó la necesidad de conseguir este tipo de compuestos.

Expertos de varias instituciones y seis compañías farmacéuticas han desarrollado algunos sustitutos. Ni los progresos ni las esperanzas deben ocultarnos que el reto sigue siendo formidable. Tras varios años de trabajo, continuamos sin ver en el horizonte la solución perfecta.

La sangre es algo tan complejo como el mismo reto que representa encontrarle un sustituto. En ella hallamos células, sales y otras sustancias, como proteínas y vitaminas, suspendidas en el plasma. Los tres tipos de células —hematíes o glóbulos rojos, leucocitos y plaquetas— constituyen hasta el 45 por ciento del volumen de la sangre. Un milímetro cúbico de sangre humana contiene entre 5 y 6 millones de hematíes, entre 5000 y 10.000 leucocitos, y entre 250.000 y 400.000 plaquetas.

Este conjunto complejo de células y compuestos realiza innumerables funciones. La sangre transporta nutrientes, hormonas y productos de desecho. Defiende al organismo ante las infecciones. Su capacidad de coagularse evita las hemorragias. Por encima de todas las tareas, sin embargo, destaca la función de captación y liberación de oxígeno y de dióxido de carbono. La hemoglobina —de la que cada glóbulo rojo contiene en su interior hasta 250 millones de moléculas— es clave en este proceso.

La hemoglobina, la más común de las proteínas de la sangre, se encuentra en la mayoría de los vertebrados y se ha conservado bastante bien a través de todo el proceso evolutivo; resulta sorprendente su similaridad en las diferentes especies, estando siempre constituida por cuatro cadenas polipeptídicas. En el hombre, la hemoglobina consta de dos cadenas alfa idénticas y dos cadenas beta también idénticas, cada una de ellas formada a su vez por 140 aminoácidos. Una cadena alfa se une con firmeza a una cadena beta, formando un dímero; los dos dímeros alfa-beta mantienen entre sí una unión débil y engendran un tetrámero.

Cada una de estas cadenas polipeptídicas contiene un grupo hemo, que a su vez contiene una molécula de hierro. Los átomos de hierro son los centros de unión del oxígeno; cada molécula de hemoglobina se enlaza a cuatro moléculas de oxígeno. La hemoglobina capta oxígeno en los pulmones y lo transporta por el organismo. Cuanto más oxígeno capte la molécula de hemoglobina, tanto más competente se tornará para atrapar dicho gas; por una razón: al aprehender una molécula de oxígeno cambia la forma de la hemoglobina. Este cambio de configuración abre la hemoglobina a más moléculas de oxígeno, hasta ocupar sus cuatro átomos de hierro. Una vez liberado el oxígeno de la hemoglobina en diversas partes del organismo, los hematíes captan el dióxido de carbono —un producto de desecho de la respiración celular— que viaja con la sangre hasta los pulmones; allí se libera para su exhalación final.

La hemoglobina puede también atrapar otros gases. No hace mucho se descubrió su capacidad para transportar óxido nítrico, que entre otras funciones importantes interviene en el mantenimiento de la presión sanguínea. La hemoglobina ejerce así un papel vital en el transporte de gases esenciales para el organismo y para la operación normal de éste.

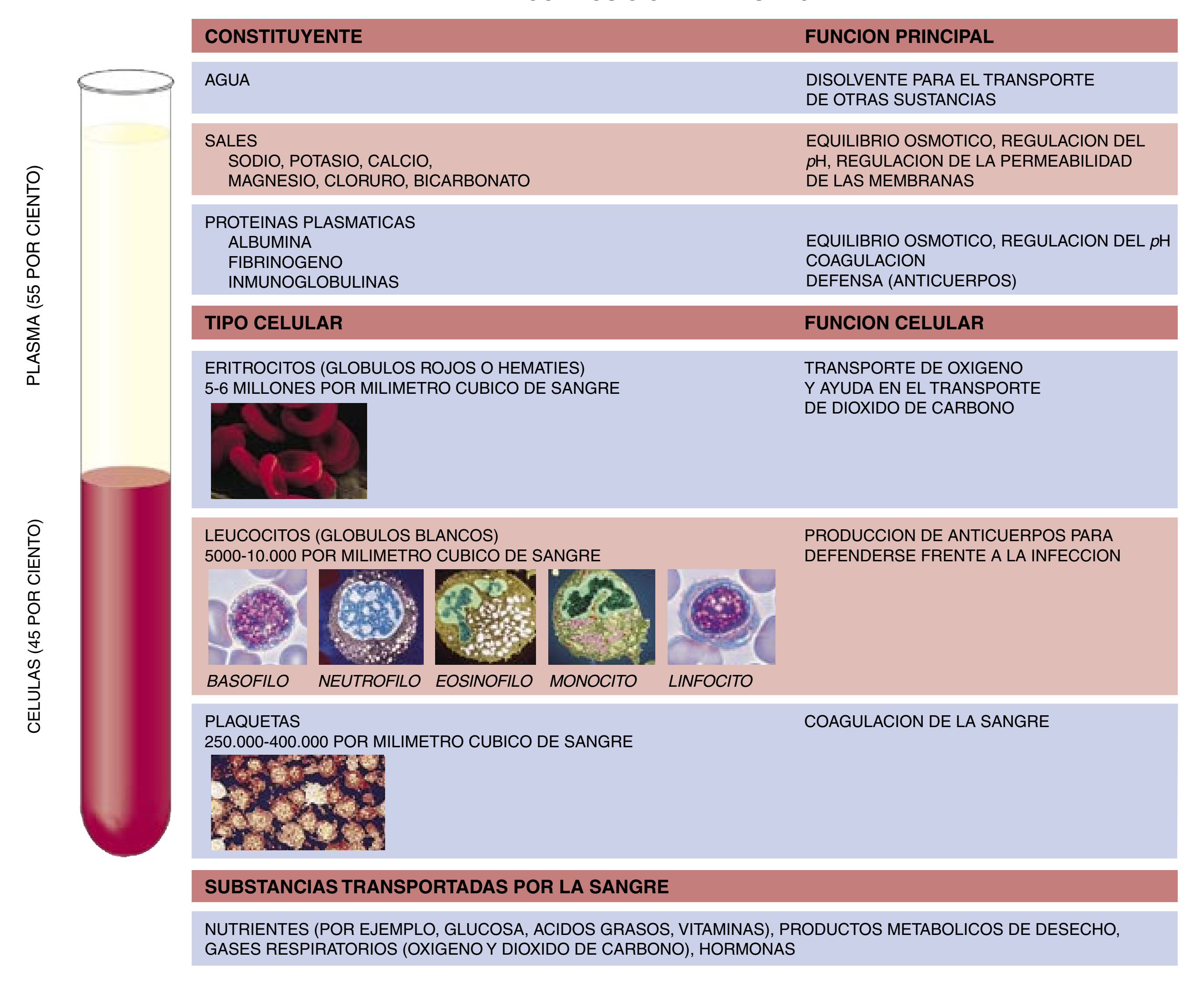
La pérdida abundante de sangre representa un riesgo grave en muchos procesos patológicos. La hemorragia de un 30 a un 40 por ciento puede compensarse por el propio organismo con la producción de hematíes, la movilización de sangre desde órganos no esenciales y el desplazamiento de líquidos a la circulación para restaurar el volumen sanguíneo. Sin embargo, y a tenor de la edad y estado de salud del individuo, unas pérdidas de sangre por encima del 40 por ciento demandan una transfusión.

1. LA TRANSFUSION resulta apremiante cuando se ha perdido más del 40 por ciento de la sangre. Conforme la población va envejeciendo, la necesidad de transfusiones aumenta; se calcula que hacia el año 2030 habrá un déficit de millones de unidades de sangre.

La historia de las transfusiones, arranca en un pasado remoto y un tanto tenebroso. En el transcurso de los siglos se han transfundido fluidos varios y singulares. Recordaremos, por muestra, la cerveza, orina, opio, resinas vegetales, leche y sangre de oveja. En 1667 Jean-Baptiste Denis, médico de Luis XIV, llevó a cabo con éxito la primera transfusión sanguínea de hombre a hombre. El procedimiento fue prohibido en Francia —y también en Roma e Inglaterra poco después— cuando la mujer de uno de los pacientes de Denis le demandó judicialmente. Resultó después que el hombre no había muerto como resultado de la transfusión, sino porque su mujer le había envenenado con arsénico. Sin embargo, la reputación de las transfusiones de sangre quedó mancillada. Aunque no sin razón. Exitos y fracasos mortales se repartían por igual.

El interés médico en el procedimiento volvió a avivarse a comienzos de nuestro siglo, cuando Karl Landsteiner descubrió el sistema de los grupos sanguíneos AB0, gracias al cual mejoró el resultado de las transfusiones. Landsteiner halló dos azúcares —los llamó A y B— que podían adornar la superficie de los hematíes; cada individuo poseía una combinación de esos dos azúcares o bien carecía de ambos. Hoy sabemos que existen cuatro combinaciones, los grupos sanguíneos. Si estos tipos se mezclan en una transfusión, los anticuerpos de la sangre del receptor reaccionan contra los azúcares (antígenos) de la superficie de los hematíes del donante. La reacción provoca la aparición de coágulos, hemólisis (cuando la hemoglobina sale de los hematíes) y, por fin, la muerte.

Importa, pues, que la sangre de la transfusión sea la adecuada para el receptor en cuestión. La del tipo A puede inyectarse a una persona con sangre A o AB; la del tipo B a quien tenga sangre B o AB; y la del tipo AB sólo a quien tenga el tipo AB. La de tipo 0, que carece del antígeno A y del B, puede inyectarse a cualquiera —lo que hace



COMPOSICION DE LA SANGRE

CONSTITUYENTE	FUNCION PRINCIPAL
AGUA	DISOLVENTE PARA EL TRANSPORTE DE OTRAS SUSTANCIAS
SALES: SODIO, POTASIO, CALCIO, MAGNESIO, CLORURO, BICARBONATO	EQUILIBRIO OSMOTICO, REGULACION DEL *p*H, REGULACION DE LA PERMEABILIDAD DE LAS MEMBRANAS
PROTEINAS PLASMATICAS	
ALBUMINA	EQUILIBRIO OSMOTICO, REGULACION DEL *p*H
FIBRINOGENO	COAGULACION
INMUNOGLOBULINAS	DEFENSA (ANTICUERPOS)
TIPO CELULAR	**FUNCION CELULAR**
ERITROCITOS (GLOBULOS ROJOS O HEMATIES) 5-6 MILLONES POR MILIMETRO CUBICO DE SANGRE	TRANSPORTE DE OXIGENO Y AYUDA EN EL TRANSPORTE DE DIOXIDO DE CARBONO
LEUCOCITOS (GLOBULOS BLANCOS) 5000-10.000 POR MILIMETRO CUBICO DE SANGRE (*BASOFILO*, *NEUTROFILO*, *EOSINOFILO*, *MONOCITO*, *LINFOCITO*)	PRODUCCION DE ANTICUERPOS PARA DEFENDERSE FRENTE A LA INFECCION
PLAQUETAS 250.000-400.000 POR MILIMETRO CUBICO DE SANGRE	COAGULACION DE LA SANGRE
SUBSTANCIAS TRANSPORTADAS POR LA SANGRE	
NUTRIENTES (POR EJEMPLO, GLUCOSA, ACIDOS GRASOS, VITAMINAS), PRODUCTOS METABOLICOS DE DESECHO, GASES RESPIRATORIOS (OXIGENO Y DIOXIDO DE CARBONO), HORMONAS	

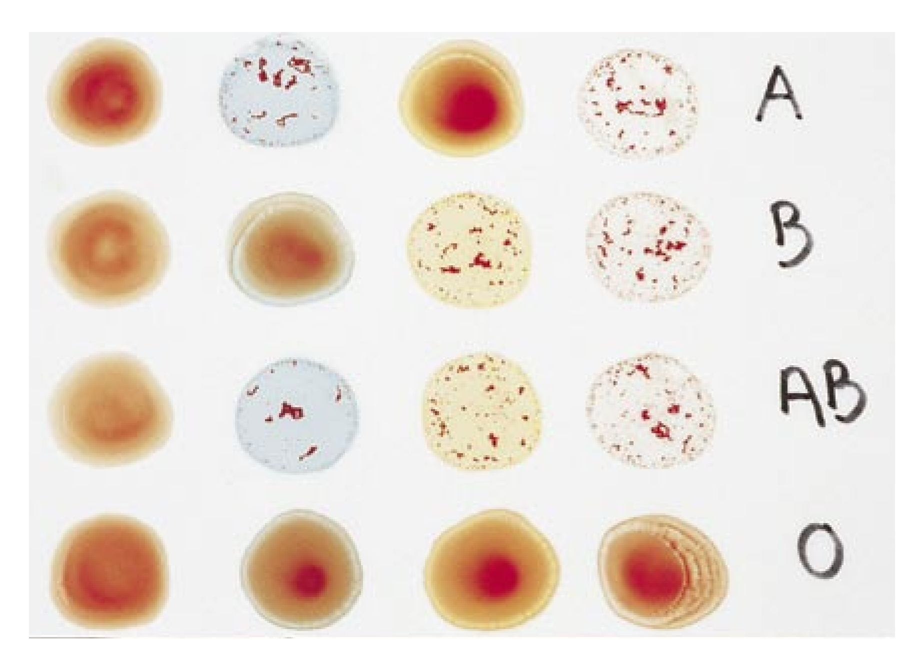
FUENTE: Biology, de Neil Campbell © 1990

2. LA DIVERSIDAD DE FUNCIONES que realiza la sangre explica la complejidad de su composición. Su volumen se reparte casi por igual entre células y plasma. A la sangre compete realizar el transporte de nutrientes y mensajeros químicos, así como regular la respiración, la coagulación y las defensas inmunitarias.

de las personas con tipo 0 donantes universales—, pero los individuos de tipo 0 sólo pueden aceptar sangre de tipo 0. Por último, los individuos de tipo AB, aceptores universales, pueden recibir sangre de los tipos A, B, AB o 0.

La determinación del grupo sanguíneo debe extenderse también al factor Rh. En los años cuarenta, la investigación en monos rhesus permitió observar en la sangre un antígeno Rh; si el individuo lo presenta, se dice que es Rh+; si carece de este antígeno, Rh–. En las transfusiones sólo debe darse sangre Rh+ a pacientes Rh+; la sangre Rh–, sin embargo, puede darse tanto a individuos Rh+ como Rh–.

Más de 23 millones de unidades de sangre se transfunden cada año, según los informes de la Asociación Americana de Bancos de Sangre. El riesgo de muerte por transfusión es de uno entre 100.000; por mor de comparación, la probabilidad de morir en accidente de circulación es de dos entre 100.000, y de uno entre 10.000 de morir de gripe. El riesgo incluye la posibilidad de errores en la determinación del grupo sanguíneo, así como de infecciones por bacterias y virus. Se han producido casos de sida por transfusiones con sangre contaminada. Amén del riesgo de sida, las transfusiones pueden introducir diversas formas de virus de la hepatitis. Un estudio reciente del *New England Journal of Medicine* cifraba la probabilidad de adquirir por esa vía la hepatitis B: era de una persona de cada 63.000; y de una de cada 103.000 la hepatitis C.



3. LOS GRUPOS SANGUINEOS se definen por la presencia o ausencia de antígenos A, B y Rh en la superficie de los hematíes. Una sangre pertenece al grupo A porque lleva el antígeno A, al B porque lleva sólo el B, al AB porque lleva ambos, y al 0 porque carece de los dos. Se dice también que una sangre es Rh+ si tiene el antígeno Rh; de lo contrario es Rh–. Debe determinarse cuidadosamente el grupo sanguíneo, ya que tienen que coincidir las características de donante y receptor para evitar que la transfusión provoque una reacción inmunitaria fatal en el paciente.

Un buen sucedáneo de la sangre ha de reunir un mínimo de requisitos imprescindibles. De entrada, debe hallarse exento de toxicidad, transportarse sin dificultad y no ser vector de enfermedades. No despertará ninguna respuesta inmunitaria y habrá de servir para todos los grupos sanguíneos. El compuesto ha de permanecer también en circulación hasta que el organismo restaure su propia sangre. Su eliminación no provocará efectos secundarios. Siendo caro y complicado el almacenamiento —la sangre debe conservarse a 4 ºC y, aun así, sólo aguanta 42 días—, a un buen sucedáneo se le exigirá una vida larga. Tendrá, además, que desempeñar muchas de las funciones de la sangre.

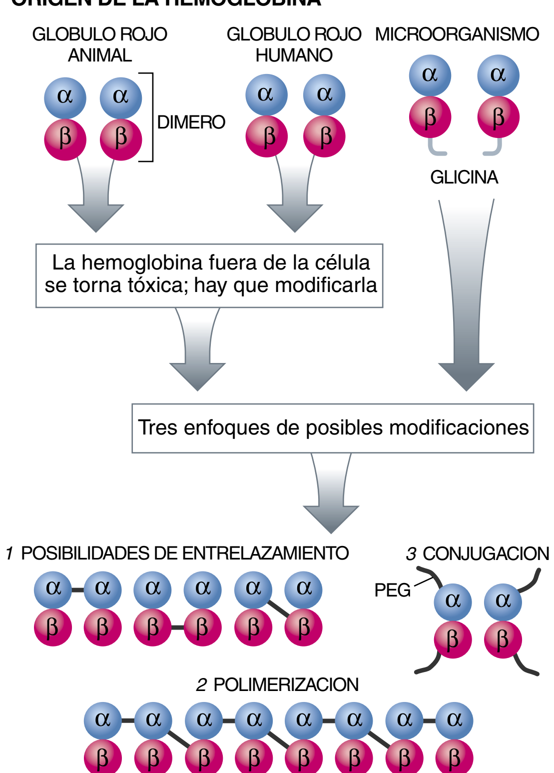
Se pretende que los sucedáneos de la sangre que lleguen al mercado cumplan todos los requisitos apuntados, con la excepción de los señalados en último lugar; la atención se centra en reproducir la función básica de la sangre, la del transporte de oxígeno. (Los sucedáneos difieren del suero salino fisiológico, plasma o sueros glucosados, líquidos que se han desarrollado para aumentar el volumen de la sangre, no para restablecer sus otras funciones.) En el transcurso de estos años, han surgido dos enfoques. Uno se basa en la preparación de productos químicos y el segundo en la hemoglobina.

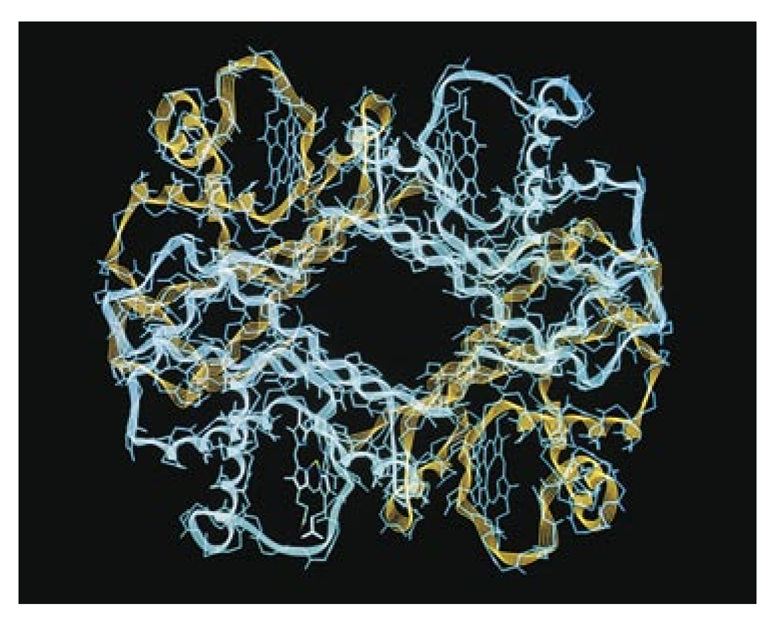
Quienes proponen el recurso a sustancias químicas piensan en los perfluorocarbonos (PFC), compuestos sintéticos transportadores de oxígeno. Quienes abogan por la estrategia de la hemoglobina razonan que sólo se alcanzará la capacidad de la sangre de captar y transportar oxígeno si se emplea la misma sustancia que la sangre utiliza. (Hay en marcha también otros proyectos, pero ninguna de las soluciones sugeridas ha pasado aún a la fase de experimentación clínica; me refiero a la producción de hemoglobina por animales transgénicos, la alteración de la superficie de los hematíes para producir glóbulos rojos universales, la liofilización de los hematíes y la encapsulación de la hemoglobina en liposomas, los llamados neohematíes.)

Los PFC pueden disolver grandes cantidades de oxígeno y dióxido de carbono. Su fama les vino, en los años sesenta, con el experimento de Leland Clark, por el que demostró que un ratón sumergido en PFC líquido respiraba con bastante normalidad. Al ser líquidos inertes y no disolverse en el plasma, los PFC, ahora en fase de desarrollo, deben emulsificarse con un agente que les permita formar partículas que se dispersen por la sangre.

A diferencia de la hemoglobina —que atrapa y libera activamente el oxígeno— los perfluorocarbonos ceden el oxígeno de una manera pasiva. El oxígeno de los pulmones pasa a los PFC que flotan en el plasma, sin que intervengan los hematíes. Los

MARY L. NUCCI y ABRAHAM ABUCHOWSKI vienen colaborando en investigaciones sobre sucedáneos de la sangre desde hace diez años. Nucci ha trabajado como inmunóloga en Enzon, compañía en cuya fundación intervino Abuchowski, y que ambos han abandonado para establecer New Paradigm Consulting, un gabinete de asesoría médico-científico.





4. LOS SUCEDANEOS DE LA SANGRE basados en la hemoglobina responden a una de las tres formas que se señalan. La hemoglobina (*arriba*) de procedencia humana o animal —o de organismos transformados por ingeniería genética para sintetizarla— puede resultar tóxica, si carece de la protección que le ofrece el glóbulo rojo. Por eso los investigadores la cruzan químicamente (*1*), la polimerizan (*2*) o la unen a polietilenglicol, o PGE (*3*), para convertirla en hemoglobina inocua. En cualquiera de estas configuraciones puede aprovecharse para fabricar sucedáneos de la sangre.

PFC se distribuyen por el organismo; se difunde a los capilares y truecan oxígeno por dióxido de carbono.

Los PFC poseen la ventaja de que la cantidad de oxígeno que pueden captar es directamente proporcional a la cantidad de oxígeno inhalada. Por tanto, se puede administrar gas a un paciente con presión parcial de oxígeno por encima de la del aire de la habitación; los PFC pueden absorber y transportar más oxígeno. Además, los perfluorocarbonos transfieren gases con rapidez, porque éstos no tienen que difundirse a través de membranas. Las moléculas de hemoglobina, por contra, pueden transportar sólo cuatro moléculas de oxígeno a la vez, con independencia de la cantidad de oxígeno disponible, y el gas debe atravesar la membrana de los glóbulos rojos.

Los PFC se eliminan de la circulación por el sistema reticuloendotelial, que acumula las gotitas en el bazo e hígado hasta que se exhalan en forma de vapor por los pulmones. Las gotitas desaparecen entre cuatro y doce horas después de la inyección de PFC en el organismo. Sabemos muy poco de los efectos que ejerce a largo plazo la retención de PFC.

Cuando en los años sesenta se aplicaron los PFC en ratones, se presentó un grave contratiempo. No se excretaban del todo, sino que se acumulaban en los tejidos. Veinte años después, una nueva versión de los PFC consiguió entrar en la fase de experimentación clínica. Este compuesto, el Fluosol-DA (de Cruz Verde de Osaka), recibió la aprobación de uso en los EE.UU. en pacientes seleccionados, incluidos algunos que rechazan las transfusiones por motivos religiosos. Pero las complicaciones de almacenamiento, los efectos secundarios y la baja eficacia han hecho que su uso no se haya generalizado.

La siguiente generación de sucedáneos basados en PFC, diseñados para superar estos problemas, se encuentra en fase de experimentación clínica. Uno de ellos, el Oxygent (de la firma Alliance Pharmaceutical Corporation en San Diego) permite un almacenamiento de hasta dos años si se mantiene refrigerado. Otros PFC transportan hasta cuatro veces más oxígeno que los de versiones anteriores. Pero un aumento de la capacidad transportadora de oxígeno puede originar una acumulación de oxígeno en los tejidos, nociva a la postre.

El grueso de la investigación se centra, sin embargo, en la manipulación de la estructura de la hemoglobina. Parece ser que hubo unos primeros tanteos en 1868, cuando se inyectó hemoglobina en perros. No se obtuvieron resultados alentadores. Los animales enfermaban, sufrían insuficiencia renal y disminuía la capacidad de transporte de oxígeno por la sangre. Se observó que la inyección de hemoglobina desnuda —sin la envoltura que le prestan los hematíes— se tornaba inestable. Se rompía en sus dímeros, pasaba a los riñones, donde provocaba alteraciones, y terminaba por excretarse a las pocas horas. El sistema renal no filtra las subunidades, muy pequeñas, ni las devuelve a la circulación.

Los mismos problemas pueden presentarse con la hemoglobina humana. Para que esta proteína sea eficaz ha de contener 2,3-difosfoglicerato (2,3-DPG), un compuesto exclusivo de hematíes. Sin 2,3-DPG, la hemoglobina se une al oxígeno en los pulmones, pero no lo liberará en los tejidos del organismo. Sin 2,3-DPG y otros componentes de los hematíes, la hemoglobina tiene mayor propensión a autooxidarse, en cuyo proceso los átomos de hierro cambian de estado y pierden irreversiblemente la capacidad de unir moléculas de gas.

En 1969 se descubrió la posibilidad de revertir el proceso si se modificaba la hemoglobina libre. La observación puso de nuevo sobre la mesa la

capacidad de la hemoglobina como sucedáneo de la sangre. De entonces acá se han logrado varias modificaciones eficaces: entrelazamientos de cadenas alfa-alfa, beta-beta o alfa-beta; polimerización de moléculas de hemoglobina; conjugación con polietilenglicol (PEG), un polímero que entra en la composición de ciertos alimentos y cosméticos. Puesto que las modificaciones incrementan el tamaño de las moléculas de hemoglobina, se previenen las lesiones renales y se tarda más en eliminar el sucedáneo de la sangre.

Hay en Estados Unidos varios productos en fase de pruebas clínicas. Algunos se preparan a partir de sangre procedente de donantes, demasiado vieja para aprovecharla en transfusiones. El PolyHeme, de la firma Northfield Laboratories en Evanston, es una hemoglobina humana polimerizada con posibilidades en cirugía y traumatología. Se trata de un compuesto obtenido por piridoxilación, una reorganización de la molécula de hemoglobina para mejorar su capacidad transportadora de oxígeno; luego, se polimeriza para aumentar su tamaño. Otro, elaborado por Somatogen en Boulder, entrelaza subunidades de hemoglobina humana. Se produce mediante técnicas de recombinación en *Escherichia coli*. Hemopure, de Biopure en Cambridge, está constituido por hemoglobina polimerizada de sangre bovina. Este sucedáneo se está estudiando en traumatismos, cirugía y anemia falciforme.

Nuestra investigación se ha centrado en la hemoglobina bovina, que es barata, se obtiene con facilidad y, a diferencia de la humana, no requiere la presencia de 2,3-DPG para liberar oxígeno. Al combinar la hemoglobina bovina con el PEG hemos conseguido estabilizar la molécula, su tamaño aumenta y con ello también su permanencia en el organismo.

La PEG-hemoglobina se halla en fase de estudio para su aplicación en el refuerzo del tratamiento de ciertos tumores sólidos. Muchos de estos tumores tienen unos niveles bajos de oxígeno en el centro de la masa tumoral y, como la radioterapia requiere la presencia de oxígeno para que sea eficaz, son resistentes a la radiación. Sin embargo, utilizando PEG-hemoglobina se ha conseguido hacer llegar el oxígeno hasta el centro del tumor. El sucedáneo se está usando también en el tratamiento de la isquemia cerebral; puesto que la hemoglobina libre resulta ser menor que un glóbulo rojo, puede atravesar mejor los vasos obstruidos y aportar oxígeno a las células en apuros.



5. ESTE RATON RESPIRA, pese a estar sumergido en un líquido, gracias a la presencia de perfluorocarbonos. Dichos compuestos pueden disolver grandes cantidades de oxígeno, permitiendo, por tanto, que el ratón respire. Así lo demostró Leland Clark en los años sesenta con esta famosa fotografía. Los perfluorocarbonos se cuentan entre los sucedáneos de la sangre.

Pese a tales avances, el camino que lleva a los sucedáneos está empedrado de fracasos. Cada paso hacia adelante parece contrarrestado por algún retroceso. Puesto que el volumen que debe administrarse al paciente ha de ser importante, tenemos que resolver problemas de seguridad distintos de los que se presentan en medicamentos administrados en dosis normales. La mayoría de los fármacos se dispensan en miligramos; en cambio, los sucedáneos basados en la hemoglobina en cantidades superiores a los 50 y 100 gramos. No se olvide que los sucedáneos no sólo se aplican por su capacidad transportadora de oxígeno, sino también con el fin de restablecer el volumen sanguíneo.

Seguimos ignorando los efectos a largo plazo. Los sucedáneos en fase de experimentación presentan cierta toxicidad a corto plazo, que se manifiesta en hipertensión, alteración de la función renal, taquicardia y dolor gastrointestinal. Habida cuenta de que su administración coincidirá con situaciones de grave peligro para la vida, se impone demostrar que los beneficios a corto plazo superan los riesgos a largo plazo, así como otros que puedan derivarse del uso crónico de ellos.

No hay tipo de sucedáneo que no haya de habérselas con su propio obstáculo. Con los compuestos que se basan en los PFC deben resolverse los problemas de retención, toxicidad, corta vida en circulación y liberación excesiva de oxígeno. Los sucedáneos que manipulan sangre envejecida se encuentran con el problema de la limitación de los suministros. La hemoglobina recombinante obtenida por ingeniería genética deberá producirse en cantidades asombrosas —unos 53.000 kilos anuales para atender sólo un 10 por ciento de la demanda en EE.UU—, una producción de ese estilo requiere unas instalaciones gigantescas y costosas. Por último, los sucedáneos basados en productos bovinos deberán obviar cualquier riesgo de transmisión de encefalopatía espongiforme u otras aún por identificar. Ello obliga a desechar no sólo reses sospechosas de haber contraído la enfermedad de las vacas locas, sino también exentas de otros agentes patógenos; previéndose asimismo que no se han de producir respuestas inmunitarias adversas en quienes reciban el producto bovino.

Por formidable que sea la tarea, dispondremos de sucedáneos de la sangre en un futuro no lejano. Su introducción en el sistema sanitario representará un avance cualitativo. La prevención de una escasez de sangre y el alivio de temores de contaminación serían ya dos de los beneficios conseguidos. Los médicos podrían usar estos sucedáneos para la conservación de órganos, en el tratamiento de la anemia falciforme y durante la angioplastia, así como en otras dolencias e intervenciones. Las posibilidades son infinitas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BLOOD SUBSTITUTES. T. M. S. Cheng. Marcel Dekker, 1989.

BLOOD SUBSTITUTES: PHYSIOLOGICAL BASIS OF EFFICACY. R. M. Winslow. Springer-Verlag, 1995.

BLOOD SUBSTITUTES: NEW CHALLENGES. Dirigido por R. M. Winslow, K. D. Vandegriff y M. Intaglietta. Birkauser, 1996.

Testigos de hielo de Groenlandia

Congelado in situ *desde hace decenas de miles de años, el hielo encierra claves importantes sobre el comportamiento del clima en el pasado y, verosímilmente, en el futuro*

Richard B. Alley y Michael L. Bender

Uno de los principales desafíos que se le plantea a la ciencia moderna es la predicción del clima. A los investigadores les encantaría conocer las sorpresas que nos pueda deparar el futuro, cambios capaces de llevar una sociedad hacia su esplendor o arrastrarla a su ruina. ¿Volverá Europa a las temperaturas más cálidas de hace 1000 años, cuando los vikingos se instalaron en Groenlandia y los bretones cultivaban sus viñedos? ¿Podría volver California a padecer siglos enteros de sequía como las experimentadas hace un milenio? El creciente interés por el calentamiento global y los gases de efecto invernadero antropogénicos han traído a primer plano el apremio por desentrañar los procesos básicos naturales que ocasionan el cambio climático.



1. GROENLANDIA CENTRAL, donde la nieve se ha acumulado desde hace más de 100.000 años, ofrece la posibilidad de estudiar los cambios climáticos ocurridos en el pasado, perforando en las profundidades del glaciar.

Para adquirir ese conocimiento fundamental, los climatólogos han dirigido la mirada al pasado. Gracias a las perforaciones acometidas en las profundidades de casquetes de hielo y glaciares en Groenlandia, la Antártida y otros lugares, se ha obtenido agua que ha permanecido congelada durante decenas de miles de años. Atrapados en el hielo se esconden los rastros de impurezas químicas que encierran una valiosa información sobre la historia del clima.

Recientes trabajos realizados por equipos europeos y estadounidenses, incluidos el nuestro, sobre testigos de hielo, obtenidos a partir de perforaciones en Groenlandia, han revelado cambios profundos en el clima, que duraron de varios siglos a milenios; cambios señalados a modo de hitos en el seno de ciclos más dilatados entre un período glacial (frío) y otro interglacial (cálido). La civilización moderna no ha sufrido esas drásticas oscilaciones climáticas. ¿Qué las ocasionó? ¿Ocurrieron simultáneamente en las altas latitudes de ambos hemisferios? ¿Que efecto ejercieron en los trópicos? Las respuestas a estas preguntas podrían abrirnos una ventana al futuro. Aunque el interés se centra en la influencia de la actividad humana sobre el cambio climático, las modificaciones operadas en el pasado podrían haber sido causadas por el cielo.

En los años veinte y treinta, Milutin Milankovitch, astrónomo serbio, investigó las sutiles variaciones inducidas en la órbita terrestre en virtud de la atracción gravitatoria ejercida por otros planetas. Estas alteraciones se manifestaban en diferentes distribuciones de intensidad de luz solar, lo que podría provocar graves variaciones en el clima a lo largo de un arco de tiempo de decenas a centenares de miles de años. Milankovitch investigó tres variables orbitales: la inclinación del eje de rotación, la precesión de la inclinación (bamboleo del eje de rotación) y la excentricidad de la órbita alrededor el Sol (esto es, si la órbita de la Tierra se aproxima a la circularidad o se estira en elipse). Los cambios en estos tres parámetros producen oscilaciones en el clima lentas y nítidas, con períodos de unos 40.000 años (regido por la inclinación), 20.000 años (gobernado por la precesión)

RICHARD B. ALLEY y MICHAEL L. BENDER formaron parte del equipo que extrajo y analizó testigos de hielo de Groenlandia central a comienzos de nuestro decenio. Hoy se hallan comprometidos en el proyecto de perforación de la Antártida occidental. Alley, docente de geología en la Universidad estatal de Pennsylvania, se ha especializado en el archivo climático en casquetes de hielo y glaciares. Bender enseña en la Universidad de Princeton. Trabaja en el análisis de oxígeno y sus isótopos para interpretar los cambios de clima.

y 100.000 o más años (dependiente de la excentricidad).

Muchos contemporáneos de Milankovitch se opusieron a su teoría astronómica del cambio climático. A él le llegó la muerte en 1958 sin haber demostrado su tesis. Andando el tiempo, sin embargo, los estudiosos de los sedimentos oceánicos realizaron notables descubrimientos. Observaron que los últimos millones de años se caracterizaban por una serie repetida de cambios de temperatura, durante los cuales avanzaban y retrocedían enormes glaciares sobre inmensas superficies, ajustando siempre su paso al predicho por Milankovitch. Para el último medio millón de años, al menos, el ciclo básico del clima —el intervalo de tiempo entre un extremo glacial o interglacial y el siguiente— duró unos 100.000 años, con oscilaciones a corto plazo de 20.000 y 40.000 años.

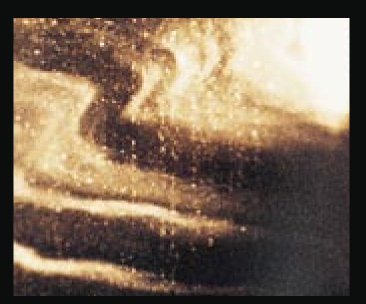
Con posterioridad, los expertos se han afanado en la búsqueda de nuevos procedimientos para abordar el clima histórico con mayor hondura. Se abandonaron los sedimentos oceánicos para centrarse en los testigos de hielo, extraídos de profundas perforaciones, de hasta unos tres kilómetros, en los casquetes ingentes de Groenlandia, la Antártida y otros puntos. Pero no valía la perforación de cualquier sitio. Había que acertar en depósitos glaciales idóneos, donde la nieve se hubiera ido acumulando a lo largo de decenas de miles de años. Conforme se va depositando la nieve, se comprime por su propio peso y termina por formar hielo, reteniendo en el proceso abundante información sobre el clima.

Lo primero que hay que establecer antes de adentrarse en el contenido del testigo es la edad de la muestra. Sin este dato, no podríamos construir una cronología donde encuadrar otras mediciones. Para nuestra fortuna, podemos determinar habitualmente la edad del hielo por simple recuento del número de años.

En el centro de Groenlandia, donde nieva a menudo, el hielo forma capas anuales. Podemos analizar los estratos cual si se tratara de los anillos de crecimiento en el tronco de un árbol, que nos dan su edad. La estratificación en el hielo glacial suele percibirse a simple vista, pues los cristales de hielo procedentes de la nieve estival son mayores que los del resto de las estaciones. Asimismo, los climatólogos pueden detectar las capas anuales por medio del análisis de la acidez del hielo, que es, por

Rebanando el tiempo

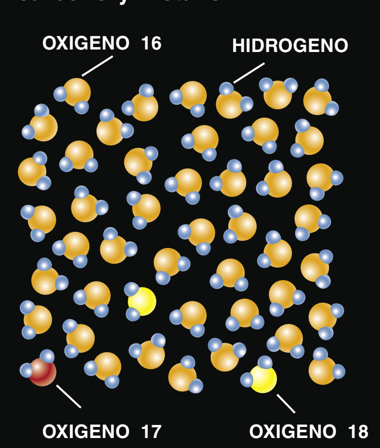
En su empeño por descifrar el registro de clima retenido en los testigos hielo (*corte de la izquierda*) los expertos acometen diferentes tipos de observaciones. Ofrecemos a continuación algunos métodos claves de análisis.



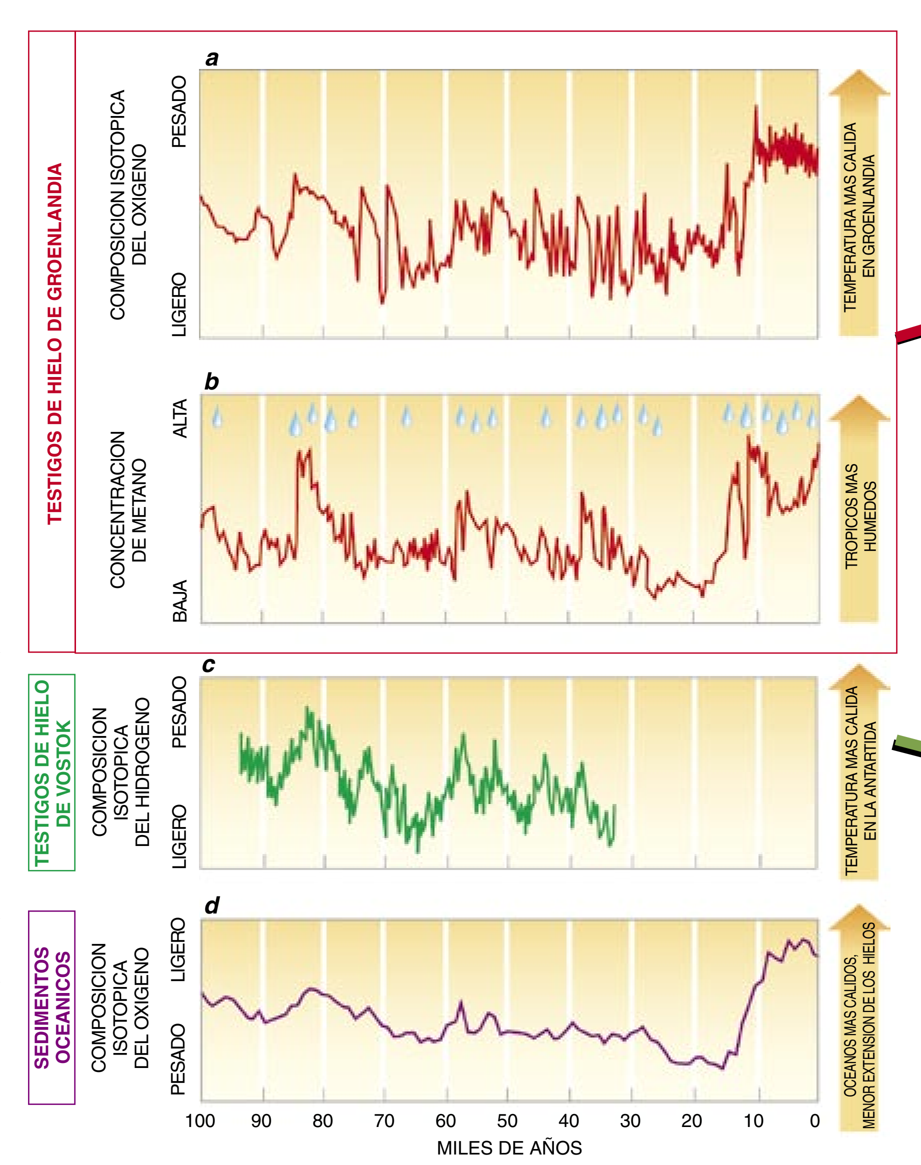
ESTRATOS ANUALES, que a menudo se perciben a simple vista. Aunque horizontales por lo común, el lento movimiento del glaciar puede deformarlos en pliegues en Z.



BURBUJAS DE AIRE, atrapadas en la nieve, terminan por quedar comprimidas en el interior del hielo. Nos hablan de la atmósfera del pasado y revelan el cambio operado en las concentraciones de dióxido de carbono y metano.



ATOMOS DE OXIGENO en el hielo. La composición puede variar. La abundancia relativa de distintos tipos refleja la temperatura en el momento de la precipitación.



2. MEDICIONES de temperatura histórica (*a*) y de metano atmosférico (*b*) a partir de testigos de hielo de Groenlandia. Los resultados han corroborado datos precedentes relativos al clima obtenidos en Vostok, la Antártida (*c*). Se ajustan asimismo al volumen total de hielo del planeta, determinado mediante análisis de sedimentos oceánicos. De acuerdo con distintas líneas de investigación, hubo un período cálido que se repetía, aproximadamente, cada 20.000 años. Se produjo una tendencia gradual al enfriamiento hasta hace 20.000 años, y un rápido calentamiento entre 20.000 y 10.000 años, en el marco de un macrociclo de unos 100.000 años.

lo general, y por razones que permanecen todavía algo oscuras, más elevada para la nieve estival que para las del resto del año. Podemos también valernos de un láser para determinar la concentración de partículas de polvo en un testigo de hielo. Hay en primavera más partículas de polvo que en otras estaciones, debido a la mayor intensidad del viento en esa estación.

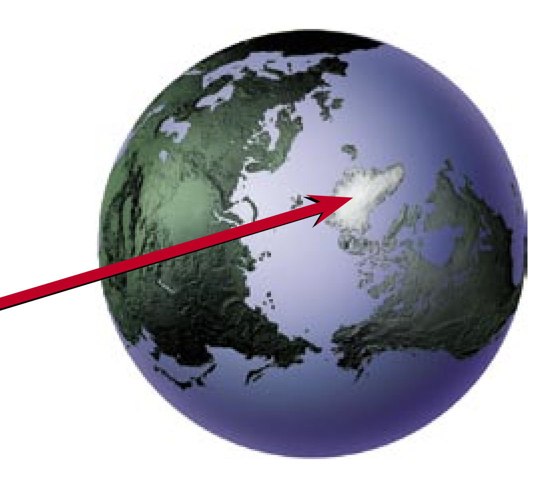
Con estos y otros indicadores, Alley, uno de los firmantes, trabajó en un proyecto de análisis de testigos de hielo en Groenlandia, dirigido por Paul A. Mayewski. Nos proponíamos obtener una cronología comparada a partir de diferentes variables independientes. En ese marco, el análisis de la composición de cenizas, en capas precisas de hielo, permitió datar e identificar los volcanes que las produjeron, correspondiéndose con las fechas de las erupciones. Esta prueba corroboradora indica que la cuantificación de los estratos anuales no introduce errores sobre el hielo de Groenlandia de siglos de antigüedad. Para los últimos 11.500 años, que cubre el período cálido del Holoceno, el recuento de estratos es fiable con un error máximo del 1 por ciento. Aunque la exactitud sea algo menos fina en el hielo histórico de épocas más frías, parece que este método no tiene nada que envidiar a los basados en otras técnicas de datación, al menos para los últimos 50.000 años. La estratificación anual se aprecia para los últimos 100.000 años, aunque a menudo aparezca distorsionada.

¿Por qué se muestran tan desorganizadas las capas profundas? Aunque se les llame sólidos, los glaciares y casquetes de hielo se expanden y disminuyen de grosor bajo la influencia de la gravedad, a modo de un huevo batido derramado sobre una sartén. Puesto que el movimiento prosigue a lo largo de decenas de miles de años, las capas inferiores de hielo acaban siendo finísimas (confundidas unas en otras) y fluyen sin dificultad como el glaciar en la morrena.

Las deformaciones resultantes hacen imposible el recuento continuo y fiable de estratos anuales a partir de cierta profundidad. A este respecto, los testigos de nuestro equipo estadounidense obtenidos en Groenlandia tenían capas que, de arriba abajo, pasaron de una disposición horizontal a mostrar pequeñas deformaciones verticales, luego pliegues en Z y por último inclinaciones de hasta 20 grados en el hielo de una antigüedad del orden de 110.000 años. Los testigos que por entonces extraían investigadores europeos revelaron una complejidad similar (aunque diferente), que caracterizaba al hielo con más de 110.000 años.

La disparidad de marras vino a resolver cierto rompecabezas. El hielo, atribuido en un comienzo a un período previo interglacial —el Eemiano, que terminó hace unos 120.000 años—, revelaba cambios de clima bruscos, con rápidas e iteradas fluctuaciones. El resultado produjo sorpresa y alarma: los climatólogos habían caracterizado a los cálidos intervalos cálidos interglaciales, del presente y del pasado, como estables y libres de bruscas alteraciones climáticas.

Así las cosas, comenzaron una serie de análisis cuidadosos que terminaron por demostrar que el flujo de hielo desorganizó las capas más antiguas de ambos testigos, el europeo y el norteamericano. Había una pista: los dos conjuntos de registros climáticos, virtualmente idénticos en los últimos 110.000 años, no admitían una co-





rrelación positiva para tiempos más remotos. Por lo que parece, estas perturbaciones ocurrieron a menor profundidad de la que se esperaba en un principio. Los paleoclimatólogos se han propuesto desentrañar tales efectos y recurren a simulaciones por ordenador y otras técnicas adicionales para identificarlos.

Con el fin de obtener un registro fiable del Eemiano, el equipo europeo inició otro proyecto de perforación en Groenlandia, a unos 340 kilómetros al noroeste de los dos puntos de perforación precedentes. En el nuevo emplazamiento, las capas con más de 110.000 años se encuentran a mayor altura del lecho rocoso que en las perforaciones precedentes. Por tanto, no cabe esperar que sean tan llamativas las distorsiones producidas por el flujo de hielo.

Si los europeos tuviesen éxito, daríamos un importante paso adelante en el conocimiento de cómo se comportó el clima, a partir, en buena medida, de los cálculos de la temperatura en el pasado. El termómetro principal usado para este fin se funda en la doble función del agua, en cuanto "ligera" o "pesada" de acuerdo con los isótopos que intervengan en su composición. El agua ligera posee oxígeno e hidrógeno ordinario, mientras que el agua pesada contiene hidrógeno con un neutrón más (deuterio), u oxígeno con uno o dos neutrones extra (oxígeno 17 u oxígeno 18, respectivamente). El enfriamiento de una masa de aire provoca la lluvia, que se lleva más agua pesada (a causa de su inferior presión de vapor) de una atmósfera cargada de humedad. En consecuencia, una nevada tierra adentro, durante épocas frías, tiende a contener agua "ligera", puesto que los isótopos pesados habrían sido ya expulsados del aire en su curso por el océano y los flancos de los casquetes de hielo antes de alcanzar dicho lugar.

En la temperatura actual del casquete helado hallamos un segundo termómetro del clima histórico. Así como al calentar en el horno un alimento congelado, tiende éste a mantener la temperatura de su ambiente anterior, es decir, seguir congelado en el centro mientras su entorno comienza a calentarse, el estrato de hielo es más frío a un kilómetro o dos de profundidad que en la superficie. En resumen, el hielo viejo "recuerda" las temperaturas extremas de la última glaciación. Tomados en conjunto, ambos termómetros muestran que los períodos más duros de la última glaciación fueron bastante fríos: sobre el promedio de Groenlandia, unos 20 grados Celsius por debajo de la temperatura actual.

Además de los registros de temperatura, los testigos traen información de la evolución histórica del régimen de precipitaciones. Se ha acudido al espesor de una capa anual (tras la oportuna corrección de cualquier distorsión ocasionada por el flujo de hielo) para medir la cantidad de nieve caída en ese año. Merced a tales análisis sabemos que, en los períodos más fríos, la precipitación en la zona central de Groenlandia fue cuatro a cinco veces menor que en la actualidad.

Con los materiales arrastrados por el viento y atrapados en el hielo se nos ofrecen pistas adicionales sobre el clima del pasado. Las partículas de grosor mayor evocan vientos más fuertes. De hecho, se sigue la trayectoria de la circulación atmosférica en la historia apoyándose en la composición del polvo para determinar su fuente; es lo que observamos en el análisis de cenizas para identificar la erupción volcánica involucrada. Entre los materiales traza recuperados con los testigos de hielo aparecen moléculas procedentes de algas marinas e isótopos radiactivos producidos en el aire por la acción de los rayos cósmicos.

Una débil concentración de estas sustancias indica un abastecimiento menor o una mayor precipitación de nieve, que diluye estos materiales. La estratigrafía anual recogida en testigos extraídos de Groenlandia central permitía determinar la tasa de acumulación de nieve; gracias a ello, pudo separarse un efecto del otro. Una vez operada dicha segregación, los cambios a través del tiempo se centuplicaron para el caso de algunos materiales importados por la acción del viento; así ocurrió con el calcio, de donde se desprendía que, durante los intervalos fríos, se produjeron vientos más fuertes y existieron desiertos quizá más extensos.

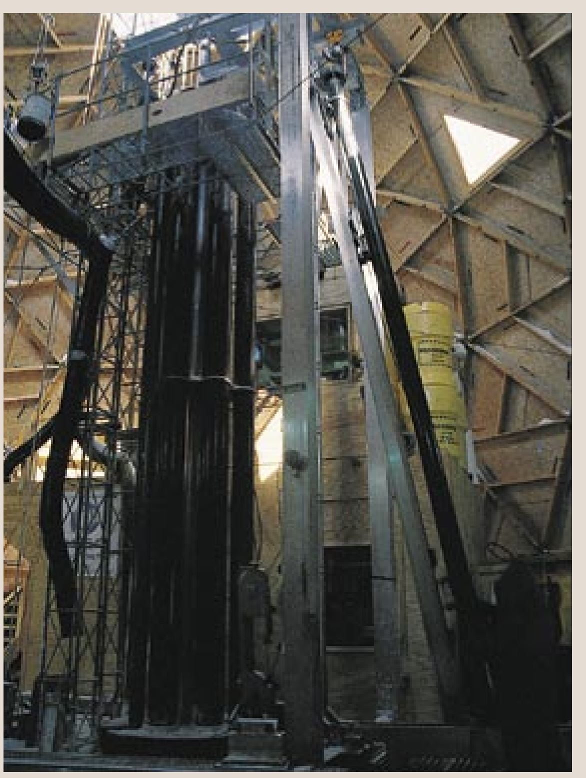
A su vez, el hielo es un almacén óptimo para muestras históricas de aire. En la nieve fresca, las moléculas gaseosas circulan sin problemas por los poros abiertos entre los cristales de hielo. Sin embargo, el peso de la nieve que se acumula en el casquete oprime las capas subyacentes y estrecha cada vez más los poros hasta que, a una profundidad entre 40 y 120 metros, la presión alcanza magnitud suficiente para encerrar el aire en burbujas, estancas en el interior del hielo.

El análisis de esas muestras diminutas de aire atrapado que han realizado Bender, firmante de este artículo, y otros investigando hielos de Groenlandia y la Antártida pone de manifiesto el cambio de la concentración de gases atmosféricos a través del tiempo. En particular, se ha determinado la variación natural de gases de efecto invernadero atrapadores de calor. Así, desde el período glacial al interglacial, las concentraciones de metano y dióxido de carbono crecieron un 50 y un 75 por ciento, respectivamente. Esta información permite colocar en perspectiva los recientes aumentos adicionales ocasionados por la actividad humana: 30 por ciento para el dióxido de carbono y 160 por ciento para el metano.

El estudio del aire atrapado aporta un beneficio colateral. La atmósfera global se mezcla en seguida, lo que significa que su aspecto vendrá a ser muy parecido en cualquier lugar que consideremos. Por esa razón, puede afirmarse sin miedo a error que los cambios en composición atmosférica ocurrieron simultáneamente en Groenlandia y la Antártida, y, en consecuencia, podemos apoyarnos en las

Herramientas de trabajo

El taladro de perforación, esencialmente un fuste hueco con cuchillas afiladas en la punta, desciende desde la plataforma hasta el punto de perforación lastrado por un cable (*derecha*). Para impedir que el agujero se desplome sobre sí mismo, los técnicos inyectan butilacetato, un fluido con el que se iguala la presión respecto al hielo circundante. (Empleado como aditivo, el butilacetato confiere al alimento un característico aroma de piña americana.)



La figura *a* muestra las ballestas de hoja que se asen fuertemente al hielo adyacente para impedir que la parte superior del equipo se tuerza o gire, mientras la parte inferior perfora.

a

b

c

BALLESTA DE HOJA

La figura *b* muestra el motor eléctrico unido al tubo. El rotor agita las cuchillas contra el hielo, seccionándolo en cortes finos que se bombean hacia el exterior de la sonda. Esa forma de perforar deja un cilindro, o testigo, de hielo en su interior.

MOTOR ELECTRICO

GARRA DE TESTIGOS

CUCHILLA DE HIELO

La figura *c* muestra el afilado pivote metálico, o “garra de testigos”. Debe deslizar suavemente la carcasa del testigo mientras avanza la perforación. Al izar la sonda, las garras, que están inclinadas ligeramente hacia arriba, excavan por debajo del testigo para rebanarlo del hielo circundante. Las garras mantienen también el testigo dentro de la sonda, mientras el conjunto entero es izado por torsión tubo arriba.

mediciones de gases para correlacionar testigos de hielo, extraídos en puntos antípodas del planeta.

El examen de los testigos de hielo de Groenlandia ha venido a respaldar los resultados de investigaciones anteriores en núcleos de hielo antártico y en sedimentos marinos. De la conjugación de esas distintas líneas de trabajo recibe un apoyo sólido la teoría astronómica del cambio climático de Milankovitch. Esos registros diferentes muestran altas temperaturas hace unos 103.000, 82.000, 60.000, 35.000 y 10.000 años; secuencia que refleja, siquiera burdamente, el ciclo de precesión de Milankovitch, de 20.000 años.

Pero, quizá, los aspectos más llamativos de los testigos de hielo de Groenlandia sean los episodios interestadiales. Duran esos intervalos entre cientos y miles de años. En el transcurso de los mismos, Groenlandia se calentó rápidamente, para enfriarse a continuación primero de forma paulatina y luego a mayor velocidad. Los testigos muestran sin ambages que hace entre 100.000 y 20.000 años se produjeron un par de docenas de episodios interestadiales, no predichos en ningún caso por la teoría de Milankovitch.

Hay otro fenómeno a destacar: los testigos de hielo de Groenlandia demuestran que la concentración de metano de la atmósfera aumentó en cada episodio interestadial. El metano lo producen las bacterias en ambientes

donde escasea el oxígeno; por ejemplo, en los pantanos tropicales y ciénagas. Unos niveles altos de metano en el hielo indican que, durante los episodios interestadiales, debieron de proliferar los humedales tropicales en virtud del aumento de las precipitaciones.

Una notable característica de los episodios interestadiales reside en su brusquedad. En escasos decenios, a veces incluso en intervalo de pocos años, se produjeron cambios de 5 a 10 grados Celsius o más, se dobló la nieve caída y decuplicó el polvo acarreado. Este comportamiento tan drástico solía darse en temporadas de temperaturas intermedias a lo largo de los últimos 100.000 años; la parte más fría de la edad del hielo y la más cálida del período moderno son, en comparación, más estables. Inmediatamente antes y después de los grandes saltos interestadiales, el clima fluctuaba a veces entre intervalos más cortos de frío y calor, comportamiento éste que los científicos han apodado de parpadeo climático. A los cambios interestadiales se añaden así oscilaciones climáticas entre un estado cálido y otro frío, pese a que Milankovitch predijera transiciones graduales.

Para explicar este comportamiento, de apariencia errática, se han explorado otros factores, además de la órbita de la Tierra. Mediante refinados modelos informáticos, se ha intentado descubrir las "teleconexiones", por qué el cambio en el clima de una región geográfica desencadena variaciones en otras. Como señalan investigaciones recientes, un calentamiento en latitudes altas puede alterar la circulación del océano o de la atmósfera, de manera que también se produzca un aumento de temperatura en los trópicos. Por culpa de ese calentamiento en bajas latitudes se produciría una evaporación más rápida del agua. Con mayor cantidad de vapor de agua (un gas de invernadero), habría más calor atrapado en la vecindad de la superficie terrestre.

De forma similar, durante las épocas glaciales, los inmensos casquetes de hielo continental y las enormes extensiones de océano helado que los rodeaban, reflejaron hacia el espacio gran cantidad de luz solar. En períodos cálidos, la fusión de los hielos permitía una mayor absorción de la radiación del Sol. Además, la alta concentración de dióxido de carbono, vapor de agua y metano intensificó la retención de calor.

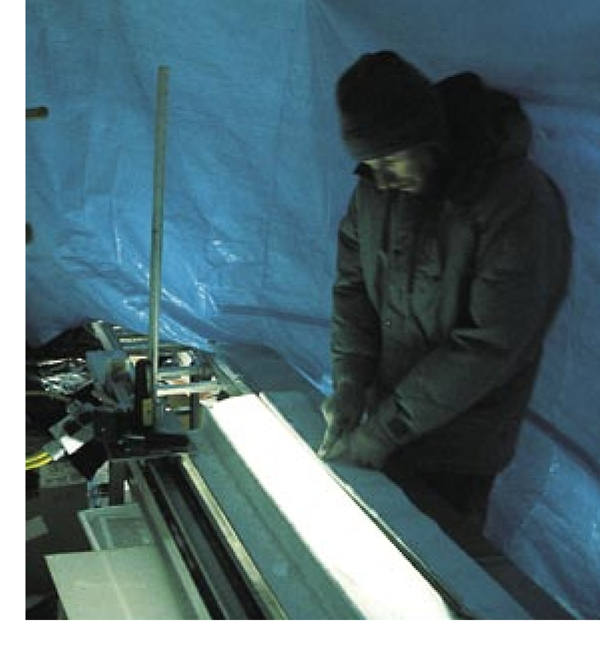
En razón de tales interacciones, los climatólogos dedujeron que las regiones del planeta se calentarían o se enfriarían de consuno. Por lo que resultó toda una sorpresa la conclusión a la que llegaron, por caminos separados, Thomas F. Stocker y Thomas J. Crowley. En 1992 postularon que, para eventos climáticos rápidos, Groenlandia y la Antártida cambiarían en sentido antagónico.

Estudiando los efectos de las corrientes oceánicas, Stocker y Crowley advirtieron que las aguas saladas y tibias de la Corriente del Golfo fluyen del ecuador hacia el Artico, donde liberan calor a la atmósfera y proporcionan de ese modo el clima de relativa estabilidad de Europa septentrional. Al enfriarse, las aguas saladas se vuelven más densas y descienden a las profundidades del océano, donde fluyen hacia el sur, a modo de una gran "cinta transportadora". Durante los duros estadios de las glaciaciones, la cinta estaba detenida o muy apagada; la corriente, más lenta, de aguas ecuatoriales que subían al Artico abandonaba Groenlandia y el norte de Europa notablemente enfriada. En los períodos interestadiales, la cinta funcionaba con vigor.

Stocker y Crowley examinaron la incidencia de esta circulación oceánica en el clima del hemisferio meridional. Atinaron en observar que la cinta transportadora enfría el sur a la vez que calienta el norte, y viceversa. Por un doble efecto. En el primer caso, la corriente de aguas profundas frías que avanzan hacia el Sur provoca una corriente de regreso hacia el Norte de aguas más superficiales y cálidas, que le aportan calor adicional, mientras lo roban en el sur. En el segundo, la lentitud de la cinta transportadora facilita que lleguen aguas más cálidas a la superficie marina periantártica, donde las aguas liberan calor que calienta el aire del lejano Sur.

Mediados los noventa esta teoría asincrónica del cambio climático recibió un sólido apoyo de la paleontología. En su investigación de fósiles de foraminíferos (conchas marinas microscópicas), los expertos hallaron que el océano Antártico era cálido cuando la cinta transportadora estaba parada. Además, en línea con lo predicho por Stocker y Crowley, Wallace S. Broecker reexaminó el clima registrado durante la última deglaciación, hace entre 20.000 y 10.000 años. Mostró que el calentamiento quedó paralizado en la Antártida durante intervalos de tiempo en los que se produjeron aumentos rápidos de temperatura en Groenlandia, y viceversa.

Bender y otros han demostrado que los grandes episodios estadiales e interestadiales que aparecen en los testigos de Groenlandia hallan su registro correspondiente en la Antártida, aunque los cambios climáticos operados en el sur no sean ni tan intensos, ni tan bruscos. Las incertidumbres en la datación precisa de los testigos han impedido hasta la fecha establecer si un enfriamiento en Groenlandia ocasionó un calentamiento en la Antártida, en todos esos eventos. Los laboratorios de Grenoble, Berna y otros se aprestan a extender las correlaciones exactas hasta la mitad de la última glaciación.



3. EXAMEN de testigos de hielo por diversos equipos de EE.UU., Japón, Europa y Australia se realizan actualmente en la Antártida y en Groenlandia. Uno de los objetivos es determinar la relación entre el clima del Sur y del Norte.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EVIDENCE FOR GENERAL INSTABILITY OF PAST CLIMATE FROM A 250-KYR ICE-CORE RECORD. W. Dansgaard *et al.* en *Nature*; vol. 364, págs. 218-220; julio de 1993.

CLIMATE CORRELATIONS BETWEEN GREENLAND AND ANTARCTICA DURING THE PAST 100,000 YEARS. Michael Bender; Todd Sowers, Mary-Lynn Dickson, Joseph Orchardo, Pieter Grootes, Paul A. Mayewski y Dehra A. Meese en *Nature*; vol. 372, págs. 663-666; diciembre de 1994.

LARGE ARCTIC TEMPERATURE CHANGE AT THE WISCONSIN-HOLOCENE GLACIAL TRANSITION. Kurt M. Cuffey, Gary D. Clow, Richard B. Alley, Minze Stuiver; Edwin D. Waddington y Richard W. Saltus en *Science*, vol. 270, págs. 455-458; octubre de 1995.

Contaminación en casa

La normativa ambiental ha mejorado la calidad del aire de la calle. En el seno del hogar, nos acechan peligros que no han recibido la debida atención

Wayne R. Ott y John W. Roberts

Se ha producido un crimen con arma de fuego. El asesino ha huido. La policía acude al escenario y lo rastrea de forma exhaustiva. Fotografía a la víctima, recoge hasta el menor indicio y busca posibles pistas, en particular huellas dactilares. Interroga a los testigos. Las balas, extraídas en la autopsia, se analizan en el laboratorio de balística. Ese es el procedimiento habitual en todas las policías del mundo para dar con el asesino.

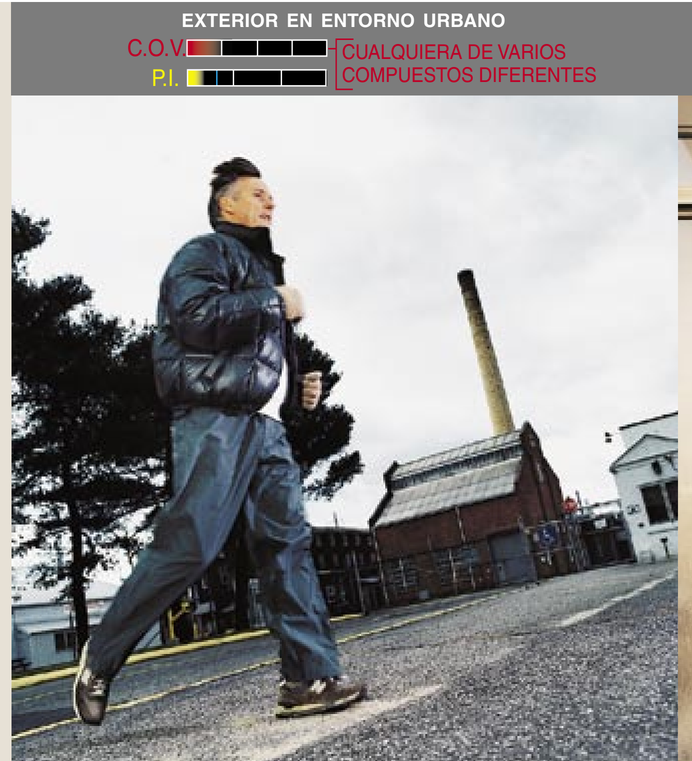
Pero, ¿qué ocurriría si se adoptase un método distinto, que empezara por examinar todas las armas disparadas en los últimos días? Los agentes podrían aducir que entre ellas está la homicida. Y no les faltaría razón. Podrían incluso acabar por descubrir al asesino. Pero eso, tras haber invertido una enorme cantidad de energía examinando las armas de los funcionarios del orden, el ejército y hasta los cazadores de patos. En un mundo de recursos limitados, probablemente se les terminaría el tiempo y el dinero antes de rozar siquiera la solución.

El preámbulo tiene su moraleja. Porque no deja de resultar sorprendente que los encargados de proteger a la población frente a los contaminantes tóxicos parezcan apostar, de manera casi universal, por la segunda estrategia. Las leyes ambientales, en su mayoría, se proponen establecer controles sólo de la emisión de residuos peligrosos a cielo abierto o en el agua. No abordan la cuantía real del riesgo por contacto directo. Al concentrar la atención en la emisión y no en la exposición, se desatiende la vertiente principal del problema: las substancias tóxicas sólo generan trastornos si llegan al cuerpo.

Hasta cierto punto ese desenfoque es comprensible. Durante demasiado tiempo hubo muy poca información sobre el grado de exposición de los ciudadanos a los contaminantes cuyo control está en manos de instancias públicas. Ni el ejecutivo ni las cámaras legislativas solían contar con datos precisos sobre el número de personas afectadas por un contaminante dado, la gravedad de la exposición o las fuentes específicas del compuesto químico debatido. Por eso, acostumbraban ceñirse a limitar la contaminación desencadenada por fuentes obvias —automóviles o industrias—, pasando por alto otras fuentes importantes, aunque menos evidentes.

Para nuestra fortuna, hemos progresado en el conocimiento de los determinantes de la exposición a las substancias tóxicas. En particular, se han desarrollado instrumentos analíticos sumamente sensibles y equipos portátiles de vigilancia. Con ellos se han realizado estudios de campo a gran escala, proyectados para averiguar dónde y en qué medida las

NIVEL DE MONOXIDO DE CARBONO (PARTES POR MILLON



1. LA VIDA DIARIA deja a muchas personas expuestas a la agresión de substancias dañinas. Nos referimos, por ejemplo, a partículas de menos de 2,5 micrometros de diámetro (*barras amarillas*), compuestos orgánicos volátiles tóxicos (*barras rojas*) y monóxido de carbono (*línea gris*). La Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha establecido normas para la exposición a tales partículas en el exterior (se muestra el límite medio diario) y para el monóxido de carbono (se muestra el límite medio para ocho horas). Más difícil resulta fijar los límites de exposición aceptables de compuestos orgánicos volátiles tóxicos. Las estimas (para partículas y compuestos orgánicos volátiles predominantes) o la medición directa (para el monóxido de carbono) en varios "microambientes", por persona y día, ilustran hasta qué punto fluctúa la exposición a los mismos. Sin embargo, los niveles más altos de riesgo acontecen en actividades desarrolladas intramuros.



WAYNE R. OTT y JOHN W. ROBERTS se han ocupado durante largo tiempo de las amenazas del entorno contra la salud. Ott dedicó 30 años a la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (EPA), donde dirigió investigaciones sobre contaminación atmosférica, substancias tóxicas y exposición humana. Ahora pertenece al claustro de la Universidad Stanford. Roberts intervino en el diseño de los tomadores de muestras empleados por la EPA para medir los contaminantes en el polvo de las alfombras. En 1982 fundó Engineering Plus, empresa especializada en la evaluación y control de la exposición a contaminantes peligrosos en el hogar.

personas se hallan expuestas a la agresividad potencial de determinadas substancias.

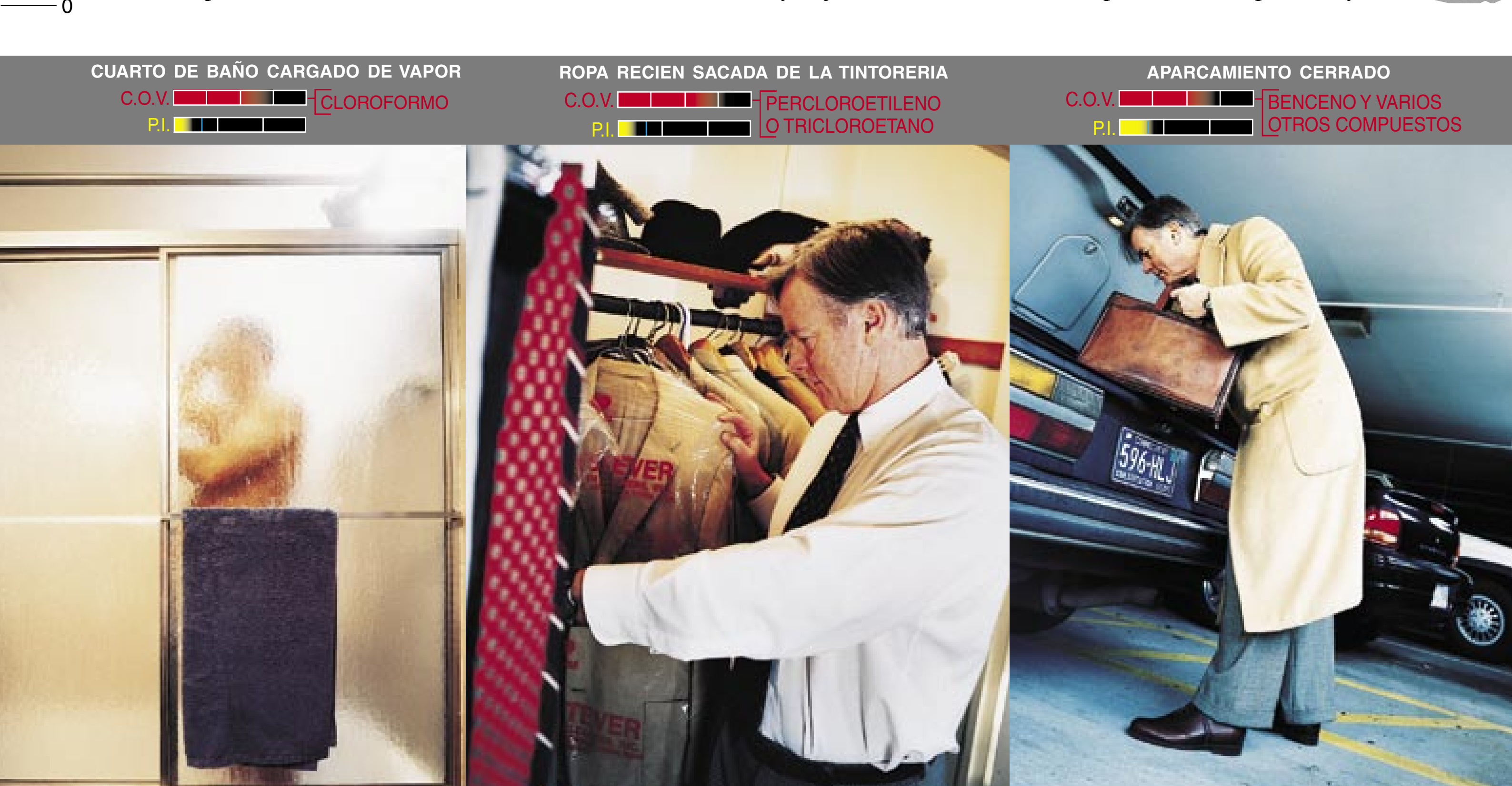
En 1980, uno de los autores (Ott), junto con Lance A. Wallace, de la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU., dio los primeros pasos para estimar la exposición diaria a las substancias tóxicas de la población en general. Ese programa, llevado a cabo por el Instituto del Research Triangle, en Carolina del Norte, y otras organizaciones de investigación contratadas, se amplió más tarde hasta incluir una veintena larga de estudios en catorce estados de la Unión. Usando los mismos métodos, otros recibieron subvención de la industria privada para acometer un trabajo similar en Alaska y en una provincia canadiense. En su mayoría, las investigaciones se apoyaron en instrumentos de vigilancia diminutos y ligeros, que pudieran llevar consigo las personas mientras desempeñaban su actividad normal. Con esos instrumentos se sabía qué contaminantes había en el entorno y en qué concentración. En algunos casos, se midieron también muestras de alimento y agua consumidos. Y se determinó, en ciertas ocasiones, los niveles en la sangre de algunos contaminantes mediante muestras del aire espirado.

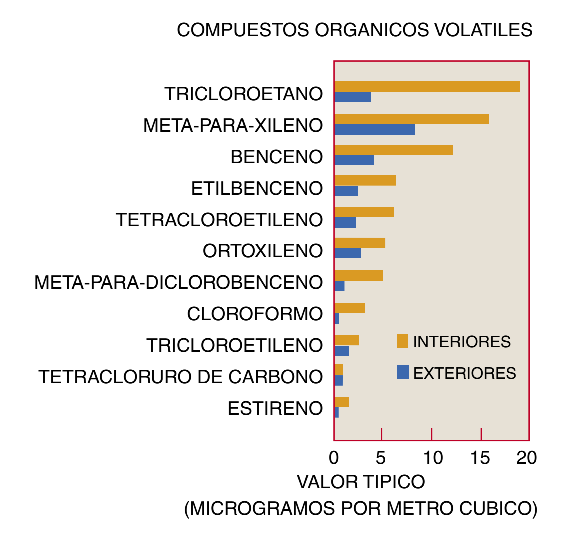
Hasta ahora, esas investigaciones relativas a la "exposición humana total" han examinado la incidencia de compuestos orgánicos volátiles, monóxido de carbono, plaguicidas o partículas peligrosas de la vida diaria de más de 3000 individuos. Era ésa una muestra cuidadosamente escogida para que representara la población estadounidense que vive en zonas urbanas o suburbanas. Los análisis, realizados con el debido nivel de finura, identificaban las substancias químicas con las que se las habían de ver de modo habitual los participantes seleccionados. Para hacernos una idea: las investigaciones de compuestos orgánicos volátiles analizaban una treintena de sustancias diferentes; entre ellas, muchas carcinógenas para los organismos.

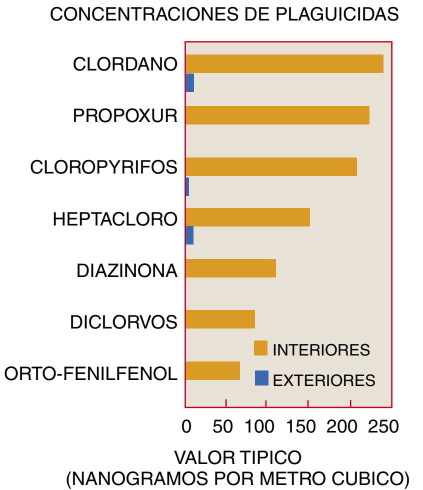
Resulta harto difícil determinar si el contacto que muchas personas tienen con esas substancias plantea un riesgo grave para la salud, por la sencilla razón de que no hay procedimiento inmediato para estimar qué potencia morbígena encierran los compuestos en concentraciones muy bajas. Pese a ello, los trabajos de campo aportaron resultados preocupantes. Ante todo, la probabilidad de que los ciudadanos experimentaran un contacto estrecho con contaminantes potencialmente tóxicos en los lugares considerados inocuos —viviendas, oficinas y automóviles— era mucho mayor que la probabilidad de exposición extramuros. La exposición a tóxicos procedentes de fuentes que estaban en el punto de mira de la normativa ambiental (cementeras, altos hornos y otros emisores poderosos de partículas, fábricas, industria local) era, en comparación, insignificante.

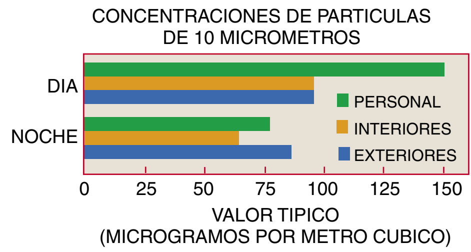
Por citar dos ciudades con numerosas plantas químicas, en Bayonne y Elizabeth, de Nueva Jersey, los niveles de 11 compuestos orgánicos volátiles que se descubrieron bajo techado superaban de lejos su concentración al aire libre. (Las concentraciones de otros compuestos volátiles ensayados fueron despreciables en ambos entornos.) Las fuentes principales residían en ambientadores, productos de limpieza y otros objetos de uso común, así como en ciertos materiales de construcción.

Pero, ¿podrían esos productos habituales del quehacer diario constituir una amenaza peor que la contaminación industrial, aun viviendo en plena zona fabril? Sí, por resumir la respuesta en una palabra. Pensemos en el caso del benceno. Sabido es que se trata de un inductor potencial de leucemia en las personas que se hallan permanentemente expuesta al mismo en altas concentraciones. El benceno está presente en la gasolina y









2. LOS ESTUDIOS de exposición revelan que el contacto que las personas tienen en el interior de la vivienda con compuestos orgánicos volátiles tóxicos y plaguicidas es muy superior al que establecen a extramuros. En buena medida, la exposición de las personas a partículas respirables durante el día es más alta que los niveles ambientales en el aire (tanto en el interior como fuera) porque en las idas y venidas creamos una suerte de "nube personal".

en algunos productos del hogar; también es uno de los 4000 compuestos que se encuentran en el humo del tabaco, de modo que convivir con un fumador multiplica la exposición a ese compuesto.

En 1985, Wallace recogió toda la información disponible acerca de la exposición al benceno por centenares de personas residentes en cinco estados diferentes. Descubrió que la concentración media de benceno inhalado venía a triplicar los niveles típicos del exterior. Calculó que alrededor del 45 por ciento de la exposición total de la población norteamericana al benceno provenía de fumar (o respirar humo exhalado por otros), un 36 por ciento de inhalar vapores de gasolina o de usar productos comunes (pegamentos), un 16 por ciento de otras fuentes domésticas (pinturas y gasolina almacenada en sótanos o garajes adosados) y sólo el 3 por ciento restante procedía de la contaminación industrial.

Pues bien, ¿qué es lo legislado? Las normas dictadas suelen limitar su campo de consideración a la cantidad bruta de benceno vertida al entorno. De ésta, la mayor parte procede de los automóviles (82 por ciento), seguidos de la industria (14 por ciento) y fuentes domésticas (3 por ciento). Los cigarrillos contribuyen sólo con un 0,1 por ciento al total.

El trabajo de Wallace demostró sin ambigüedad que la supresión de todas las emanaciones industriales de benceno reduciría los riesgos para la salud en una fracción minúscula. Por contra, hasta un recorte mínimo en el humo inhalado del tabaco —la fuente más exigua de benceno atmosférico— supondría una rebaja notable en la probabilidad de enfermedad por culpa del benceno.

Otros compuestos orgánicos volátiles que son muy tóxicos a altas concentraciones abundan más en la casa que fuera. Ocurre así con el tetracloroetileno (percloroetileno o "perc"). Este carcinógeno de animales de laboratorio se usa en la limpieza en seco de prendas de vestir. Por eso, la mayor exposición coincide cuando se vive en un edificio con instalación de limpieza en seco, nos vestimos con ropa recién sacada de la tintorería o almacenamos en el armario prendas cargadas de ese producto. Las pastillas o bolitas repelentes de polillas, desinfectantes de cuartos de baño y desodorantes son la principal fuente de exposición al paradiclorobenceno, que también produce cáncer en animales. Del trabajo de campo realizado se desprende que la exposición al pa-

FOTOCOPIADORA CON "TONER" SECO
C.O.V.
P.I.
FORMALDEHIDO, ESTIRENO Y OTROS

ESPACIO CERRADO CON FUMADORES
C.O.V.
P.I.
BENCENO Y OTROS COMPUESTOS

CASA ALFOMBRADA
C.O.V.
P.I.
PLAGUICIDAS U OTROS COMPUESTOS

FUENTES DE EMISIONES DE BENCENO

ESCAPE DE AUTOMOVILES	INDUSTRIA	ACTIVIDADES INDIVIDUALES	CIGARRILLOS
82%	14%	3%	0,1%

FUENTES DE EXPOSICION AL BENCENO

ESCAPE DE AUTOMOVILES	INDUSTRIA	ACTIVIDADES INDIVIDUALES	CIGARRILLOS
18%	3%	34%	45%

3. EL BENCENO, compuesto orgánico volátil y cancerígeno para los humanos, está muy extendido. Pero las fuentes que lo emiten en mayor cuantía (escape de los coches e industria) contribuyen de forma modesta a la exposición de la gente; la amenaza principal reside en el desprendido por los cigarrillos, vapores de gasolina y productos de consumo.

radiclorobenceno proviene, en buena medida, de fuentes que se hallan en el interior de la vivienda y no de emisiones industriales o vertederos de productos peligrosos.

Pese a la imprecisión que rodea a cualquier evaluación sobre el peligro real contra la salud, no hay duda de que siempre será mejor reducir el contacto con compuestos orgánicos volátiles y tóxicos. La mayoría puede limitar la exposición evitando los productos portadores de tales contaminantes. No es fácil, sin embargo, mantenerse libres de otros vapores peligrosos.

Nos sucede así con el cloroformo, cuyas fuentes principales de exposición las tenemos en la ducha, agua hirviendo y lavadora. El cloroformo es un gas que, a altas concentraciones, provoca cáncer en animales. Se forma a partir del cloro usado en el tratamiento de aguas. Haremos, pues, bien en reducir la exposición bebiendo agua embotellada (o agua del grifo filtrada por un tamiz de carbón vegetal), así como reforzando la ventilación del cuarto de baño y la lavadora.

Una mejor aireación rebajará, asimismo, la exposición al monóxido de carbono. Resulta éste de la combustión incompleta, que extrae oxígeno de la sangre. Ataca a las personas con dolencias cardíacas cuando lo inhalan a niveles frecuentes en el interior de las casas. Aunque ciertos estudios realizados a principios de los ochenta en Denver y Washington, D.C., confirmaron que los niveles de monóxido de carbono subían drásticamente cuando los individuos se hallaban en el interior de vehículos a motor o en su vecindad, otras investigaciones han mostrado que hornillos de gas, parrillas y hornos de funcionamiento deficiente pueden provocar condiciones de intensa toxicidad, si no producir la muerte. Los niveles exteriores de monóxido de carbono han caído notablemente con normativas restrictivas sobre reducciones en las emisiones por los automóviles. Pero costará avanzar más en esa dirección, porque la fuente primera de exposición al monóxido de carbono se halla en el interior de las viviendas.

Mayor gravedad potencial encierran las partículas del aire que se respira en el interior de las casas. En uno de los trabajos, se emplearon aparatos de toma de muestras miniaturizados para captar las partículas más finas en 178 hogares (o en sus aledaños) de Riverside, California. Los voluntarios portaban dispositivos preparados para captar partículas de diámetro igual o inferior a 10 micrometros, lo suficiente para penetrar en los pulmones.

La exposición observada durante el día superaba, nada menos que en 60 %, la esperada a juzgar por los niveles de partículas medidos en muestras de aire tomadas dentro y fuera de las casas. La razón de esa discrepancia debíase, al menos en parte, al propio comportamiento de los inquilinos: los sujetos no flotan en un medio aéreo, sino que, en sus idas y venidas, tienden a agitar "nubes personales" de polvo cargado de partículas de sus alrededores. Se comprobó que la mayoría de esas finas partículas procedían de combustión, es decir, del humo del tabaco, velas encendidas, cocina y hogar. Semejantes resultados sobre contaminación doméstica debieran



mover a preocupación. Recuérdese que algunos estudios epidemiológicos recientes han asociado con muerte prematura las elevadas concentraciones de partículas finas en la calle.

Elevaron el grado de inquietud a propósito de la contaminación doméstica los resultados de sendos trabajos acometidos, a finales de los ochenta, en Jacksonville (Florida) y Springfield (Massachusetts). Se halló en esos sitios que la concentración de plaguicidas en el aire de las estancias quintuplicaba, como mínimo, el contenido a extramuros. Lo normal era que lo decuplicara. Pero había otro aspecto a resaltar, a saber, que esos residuos incluían insecticidas aprobados solamente para uso en campo abierto. Era obvio que habían penetrado en la casa potentes compuestos dirigidos contra los termes de los cimientos. Tales venenos entraron adheridos a las suelas de los zapatos o se infiltraron en forma de gas. El riesgo constituido por el clorodano (eliminado en Norteamérica de los productos para uso doméstico en 1988) y otros plaguicidas contaminantes del aire doméstico superaba el derivado de la contaminación alimentaria.

No es infrecuente, además, que se viertan plaguicidas inadecuados directamente dentro de la casa sin saber el daño a que se exponen. Y hasta los propietarios más cultos acostumbran olvidarse de viejas aplicaciones de productos químicos peligrosos. Plaguicidas que a la intemperie tardan pocos días en descomponerse, pueden durar años en las alfombras, protegidos de la degradación causada por la luz solar y las bacterias. Esta persistencia queda patente en las mediciones del plaguicida DDT (diclorodifeniltricloroetano), cuyo uso se prohibió en los EE.UU. en 1972 a causa de su toxicidad. Pese a los años transcurridos de esa prohibición, Jonathan D. Bucley y David E. Camann hallaron que 90 de las 362 viviendas que examinaron en 1992 y 1993 presentaban DDT en las alfombras.

La verdad es que su trabajo fue más allá. Las alfombras no sólo escondían DDT. En más de la mitad de las viviendas que Buckley y Camann examinaron, la concentración de siete hidrocarburos aromáticos policíclicos estaba por encima de los niveles que provocarían de oficio un estudio formal de riesgo para viviendas edificadas cerca de una zona de intensa emisión industrial. Se trata de compuestos orgánicos tóxicos que proceden de una combustión incompleta; causan cáncer en animales y se supone que lo inducen en humanos.

Se cifra en 3000 los casos de cáncer producidos en los EE.UU por plaguicidas y compuestos orgánicos volátiles intradomésticos. No es menor, pues, su peligro que el del radón (gas radiactivo natural que se infiltra en muchas viviendas a través de los cimientos) y el humo del fumador pasivo. Además, el polvo doméstico tóxico puede constituir una particular amenaza para los infantes, que juegan en el suelo, gatean sobre las alfombras y se meten las manos en la boca. Los bebés corren especial peligro, pues sus órganos en rápido desarrollo son más propicios a dañarse, pesan sólo una parte del peso de un adulto y pueden inhalar cinco veces más polvo: en promedio, 100 miligramos por día.

Antes de 1990, año en que la EPA y el departamento de la Vivienda norteamericano establecieron las normas de extracción de muestras de polvo en alfombras, tapicería y otras superficies, era difícil cuantificar el riesgo para los niños. Pero las técnicas se han perfeccionado y podemos ya calibrar con cierta seguridad el grado de exposición. Sabemos, por ejemplo, que cada día el bebé medio ingerirá 110 nanogramos de benzo-alfa-pireno, el hidrocarburo aromático policíclico más tóxico. Aunque es aventurado indicar en qué proporción ese valor aumentará el riesgo de inducción de cáncer con el tiempo, la cuantía es para tomarla en serio; equivale a la que el niño absorbería si fumase tres cigarrillos.

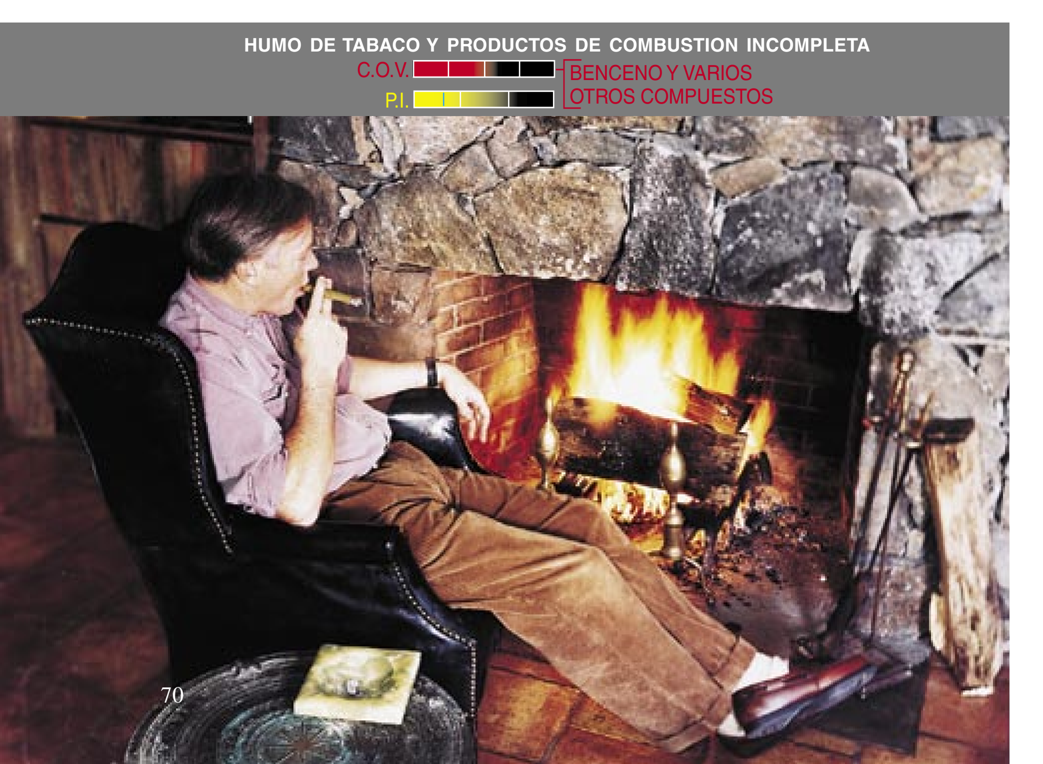
La investigación revela también que, para los pequeños, el polvo doméstico constituye la principal fuente de exposición al cadmio, plomo y otros metales pesados, así como a los difenilos policlorados y otros contaminantes orgánicos persistentes. Las moquetas, pese a su limpieza rutinaria, son las más perjudiciales porque se convierten depósitos profundos de esos compuestos tóxicos, además de hacerlo para bacterias peligrosas y alérgenos inductores de asma (parásitos, ácaros y mohos). Las moquetas mullidas y peludas son, a este propósito, peores que las alfombras delgadas. Los suelos entarimados, embaldosados o cubiertos de linóleum, más fáciles de limpiar, resultan también preferibles.

Roberts, firmante de este artículo, ha mostrado, con otros, cómo evitar la acumulación de cantidades peligrosas de polvo mediante un aspirador equipado con un sensor indicativo del nivel de exhaustividad en la extracción de partículas. Sirven de ayuda también algunas precauciones preventivas. El mero hecho de restregarse los pies en la esterilla de entrada parece dividir por seis la cantidad de plomo en una moqueta típica. Puesto que la exposición al plomo afecta a más de 900.000 niños en los EE.UU., esa práctica en una buena alfombrilla supondría un alivio sustantivo para la salud pública.

Quitarse los zapatos antes de entrar es todavía más eficaz que deslizar las suelas, si queremos rebajar los niveles de contaminantes tóxicos que emponzoñan el contorno de la casa (plomo de la pintura desconchada y plaguicidas alrededor de los cimientos). Tomando estas precauciones y usando

HUMO DE TABACO Y PRODUCTOS DE COMBUSTION INCOMPLETA

C.O.V.
P.I.
BENCENO Y VARIOS OTROS COMPUESTOS





4. APARATO de toma de muestras de una superficie. Aspira el aire cargado de partículas a la manera de los aspiradores del servicio de limpieza. Absorbe el polvo haciendo circular el aire por el interior de un dispositivo cilíndrico especial. La corriente giratoria de aire se detiene en la proximidad del fondo del vórtice, y las partículas suspendidas caen en el interior de un pequeño frasco para su ulterior análisis.



5. MEDIDOR de monóxido de carbono. Por sensor de gas emplea una pila electroquímica. La débil corriente eléctrica generada por ésta varía con el nivel ambiental de monóxido de carbono. En razón de la corriente, un microordenador interno va calculando la concentración de monóxido de carbono y registrando su valor a intervalos regulares.

6. TOMADOR personal de muestras. Registra las partículas y compuestos orgánicos volátiles a los que su portador se halla expuesto en el curso de varios días. Para atrapar las partículas, se obliga a que el aire atraviese un filtro mediante una bomba eléctrica; para atrapar los compuestos volátiles, hay que dejar que el aire se difunda a través de una membrana sobre discos de carbón.

un buen aspirador (equipado con cepillo giratorio y, preferiblemente, con sensor de polvo), se puede reducir la cantidad de polvo y otras substancias tóxicas en las alfombras a la décima parte —o, en algunos casos, hasta la centésima— del nivel habitual.

Los numerosos descubrimientos que nos ha deparado la investigación sobre la exposición diaria de las personas apuntan hacia una sola conclusión recapituladora, a saber, que los mismos contaminantes de la atmósfera abordados por la normativa ambiental se encuentran, por lo común en concentraciones muy superiores, dentro de los hogares. Algo ha tenido que ver en ello el notable progreso realizado en la mejora de la calidad del entorno tras decenios de medidas de control de las emisiones industriales y de los automóviles. De los cientos de contaminantes atmosféricos regulados por la legislación estadounidense, sólo el ozono y el dióxido de azufre predominan todavía en el exterior.

De ahí que resulte un tanto sorprendente la escasa atención prestada a la contaminación doméstica, cuyas principales fuentes, además, no cuesta mucho identificar. Las tenemos delante, doquiera miremos; por citar algunos: repelentes de insectos, plaguicidas, disolventes, desodorantes, productos de limpieza, trajes de la tintorería, alfombras polvorientas, pinturas, partículas de madera, adhesivos y humos de cocina y calefacción.

Carece de sentido mostrarse tolerantes con los contaminantes domésticos. Si esas mismas substancias abundasen en el aire exterior, y nos refiriésemos a Estados Unidos, no tardaría nada en entrar en funcionamiento la maquinaria de la Ley del Aire Limpio de 1990. Si se depositaran en el exterior cargas de camión con la misma concentración de productos químicos tóxicos que se encuentra en las alfombras, los vertederos se considerarían de alto riesgo. Ante los resultados obtenidos sobre exposición extramuros y sobre contaminación doméstica, parece llegado el momento de replantearse una normativa más acorde con la realidad.

Aunque el nivel absoluto de riesgo que encierra cada uno de los contaminantes sea harto difícil de evaluar, sí podemos medir el grado de la exposición derivado de diferentes fuentes. Por eso, para proteger mejor la salud pública habría que replantearse la normativa ambiental para recoger la exposición total que sufren las personas, en vez de limitarse a la reducción de las emisiones totales. Se trataría de un esfuerzo legal ingente, por supuesto, que habría que contrastar con su eficacia a efectos de rebajar la exposición. Pero se obtendrían innegables beneficios en la salud y en la economía.

Quienes se sientan interesados por las substancias tóxicas no tienen que esperar a cambios legislativos. El recorte de la exposición sólo exige leves modificaciones en las rutinas diarias. Con todo, para proceder con acierto hay que disponer de suficiente información. No estaría de más un etiquetado más detallado de los productos de consumo. Si una mercancía contiene un contaminante peligroso, debería exigírsele al fabricante que al menos mencionase el nombre del compuesto en la etiqueta. Armada con una mejor información sobre las substancias tóxicas contenidas en los productos corrientes y en otras fuentes domésticas, la gente podría realizar su propia elección con conocimiento de causa.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

Non-Occupational Exposure to Pesticides for Residents of Two U.S. Cities. R. W. Whitmore, F. W. Immerman, D. E. Camann, A. E. Bond y R. G. Lewis en *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 26, n.º 1, págs. 47-59; enero 1994.

Exposure ot Children to Pollutants in House Dust and Indoor Air. J. W. Roberts y P. Dickey en *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 143, págs. 59-78; 1995.

Human Exposure to Environmental Pollutants: A Decade of Experience. L. A. Wallace en *Clinical and Experimental Allergy*, vol. 25, n.º 1, págs. 4-9; 1995.

Human Exposure Assessment: The Birth of a New Science. W. R. Ort en *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* (disponible en Princeton Scientific Publishing), vol. 5, n.º 4, págs. 449-472; 1995.

Polarones magnéticos

En ciertos óxidos de manganeso la resistencia eléctrica puede cambiarse varios órdenes de magnitud al aplicar un campo magnético. La formación de polarones magnéticos es la responsable

J. M. De Teresa Nogueras y M. R. Ibarra García

Cuando Georg Simon Ohm enunció en 1826 la ley que lleva su nombre, no podía imaginar la multitud de avances técnicos que su descubrimiento iba a ocasionar en poco tiempo, ni que la explotación de la misma terminaría por condicionar nuestra vida diaria. A tenor de dicha ley, la diferencia de potencial V que se establece a través de un conductor (ya sea un circuito eléctrico o un material) es directamente proporcional a la intensidad de corriente I que circula por el mismo, siempre y cuando permanezca constante la temperatura.

La constante de proporcionalidad es la resistencia eléctrica, R, que es una propiedad intrínseca del circuito y representa la oposición presentada por éste al paso de la corriente. En el caso de los materiales esta propiedad se expresa mediante la resistividad, que es la resistencia eléctrica para una longitud y sección del material determinadas.

En la naturaleza existen materiales de elevada resistividad (por ejemplo la madera y el plástico), a los que llamamos aislantes, y materiales de muy baja resistividad (por ejemplo los metales), a los que denominamos conductores. El caso extremo lo constituyen los materiales con resistencia nula al paso de corriente o superconductores.

A partir de la ley de Ohm, Thomas A. Edison se propuso a finales del siglo XIX electrificar el planeta. Bastaba con una fuente de energía para proporcionar la diferencia de potencial, un material de baja resistividad —el cobre— para transportar la corriente y otro de alta resistividad —la fibra de algodón carbonizado (colocado adecuadamente en el interior de una bombilla)— que se volviese incandescente al paso de corriente.

El responsable de la conducción eléctrica, a escala microscópica, es el electrón, descubierto en 1897 por Joseph John Thomson. En un material sólido cristalino, donde los átomos se disponen de forma periódica y ordenada, la conducción eléctrica está asociada a la movilidad de los electrones de conducción. Por ejemplo, en el cobre metálico cada átomo proporciona un electrón móvil que puede desplazarse por el sólido, mientras que el resto de los electrones quedan localizados en torno a los núcleos de cobre y no participan en la conducción eléctrica.

Cuando se aplica una diferencia de potencial al material, los electrones de conducción experimentan una fuerza eléctrica, empiezan a moverse y originan, por tanto, una corriente eléctrica. En su desplazamiento, los electrones se encuentran con diversos obstáculos que tienden a frenarlos y causan la resistencia eléctrica. Entre estos obstáculos cabe mencionar las imperfecciones y defectos del material, las colisiones con los iones de la red cristalina, con transferencia de energía a las vibraciones de ésta, y la interacción magnética de los electrones con los iones que forman el sólido.

Las colisiones son por lo común el principal mecanismo responsable de la resistencia eléctrica. En ellas se produce un intercambio de energía del electrón con las vibraciones de la red, es decir, con el movimiento acompasado de los iones que constituyen el sólido. Cuanto mayor es la temperatura, más intensas son las vibraciones de la red y mayor es la dispersión que sufren los electrones de conducción al moverse, de forma que aumenta la resistividad. A este tipo de conducción eléctrica se la denomina conducción metálica.

Propia de la conducción metálica es la existencia de electrones que fluyen con gran libertad a lo largo del material. De tales electrones se dice que están deslocalizados porque sus funciones de onda se extienden por todo el sólido (la probabilidad de encontrar un electrón en un lugar determinado es proporcional al cuadrado de la función de ondas en ese punto).

Hay otra clase de conducción eléctrica ligeramente distinta de la anterior. Se trata de la conducción polarónica. Bajo determinadas circunstancias, los electrones responsables de la conducción pueden quedar atrapados temporalmente en algunos lugares del material, incrementando la resistencia eléctrica del medio. Cuando un electrón queda así localizado, se produce un reacomodo de las posiciones de los iones circundantes y aparece un estado de distinto volumen.

En esa situación, el electrón queda atrapado en un pozo de potencial, donde existe un mínimo de energía. Allí permanece temporalmente. La función de ondas del electrón, que describe su estado cuántico, pasa a quedar localizada en torno a la posición que ocupa. Al conjunto formado por el electrón localizado y la distorsión de la red asociada se le

J. M. DE TERESA NOGUERAS y M. R. IBARRA GARCIA se hallan adscritos a la Universidad de Zaragoza (UZA). De Teresa recibió en ella el doctorado en ciencias físicas en 1997. Ibarra es catedrático de física de la materia condensada en la UZA desde 1995 y miembro del panel de magnetismo de la Sociedad Física Europea. Su labor de investigación en el Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (entidad mixta UZA-CSIC) ha conducido al descubrimiento del mecanismo que produce la magnetorresistencia gigante en los óxidos de manganeso.

denomina polarón de red, concepto introducido en 1933 por el físico soviético Lev D. Landau.

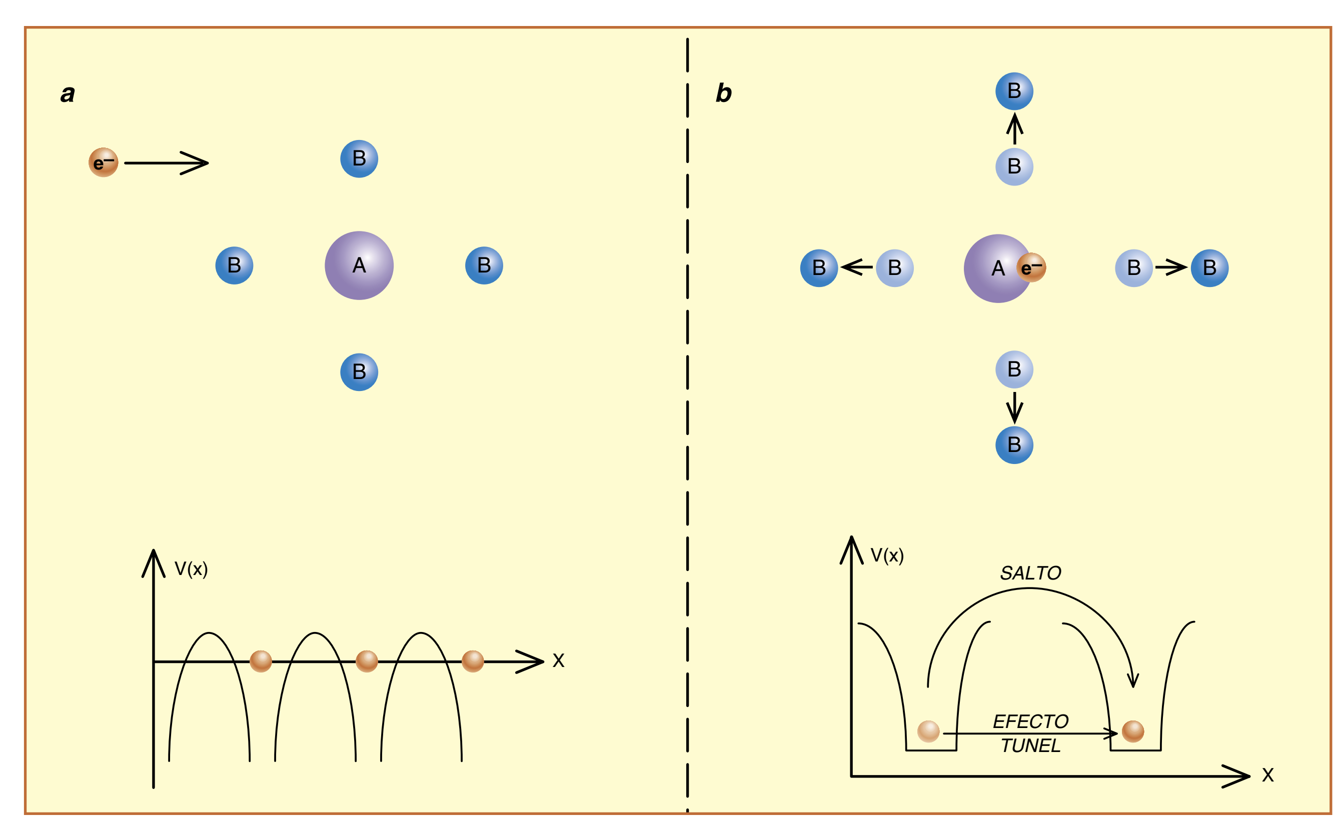
En los años cincuenta, T. Holstein abordó los fundamentos teóricos de la formación y movimiento de los polarones de red. Descubrió que, para que aparezcan polarones de red, es necesario un fuerte acoplamiento entre los electrones y las vibraciones de la red. Dicho de otro modo, se requiere que la localización de un electrón provoque un cambio notable en la vibración de los iones que forman el sólido.

El movimiento del polarón de red se produce cuando el electrón pasa del pozo de potencial en que se encuentra a otro vecino, bien por efecto túnel ("quantum tunelling"), es decir, mediante un paso directo por probabilidad cuántica, o bien por salto de la barrera de potencial por agitación térmica (energía aportada por las vibraciones de la red, que es proporcional a la temperatura). A bajas temperaturas domina el primer mecanismo y a altas temperaturas el segundo. Cuando la conducción es polarónica, al aumentar la temperatura la resistencia disminuye, a diferencia de lo que ocurre en conducción metálica.

Por esas mismas fechas, G. H. Jonker y J. H. Van Santen estudiaron las propiedades cristalográficas y magnéticas de un tipo de óxidos de manganeso de fórmula $(TR_{1-x}{}^{+3}A_x{}^{+2})MnO_3$, donde x varía entre 0 y 1, TR representa un ion trivalente de tierra rara (lantano, praseodimio, etcétera) y A, un ion divalente (calcio, estroncio, bario, etc.). Recordemos que la valencia de un ion en un sólido es el número de electrones de los que se desprende o atrapa un átomo al pasar a formar parte del sólido. La estructura cristalográfica de estos compuestos es del tipo perovskita, que se caracteriza por estar los átomos de manganeso situados en los vértices de un cubo y rodeados de 6 oxígenos que forman octaedros, mientras que los átomos de TR (o A) se sitúan en el centro del cubo. Esta descripción corresponde a una perovskita ideal cúbica, en la que se verifica que el ángulo de enlace Mn-O-Mn es de 180º.

Si los iones TR (o A) no tienen un tamaño suficiente, los octaedros MnO_6 giran para llenar el espacio vacío alrededor de estos iones; se abandona de ese modo la estructura cúbica por otra de menor simetría (romboédrica u ortorrómbica, usualmente). Cuando esto ocurre, el ángulo de enlace Mn-O-Mn pasa a ser menor de 180º.

En un compuesto del tipo $(TR^{+3})MnO_3$, el ion de Mn presenta valencia



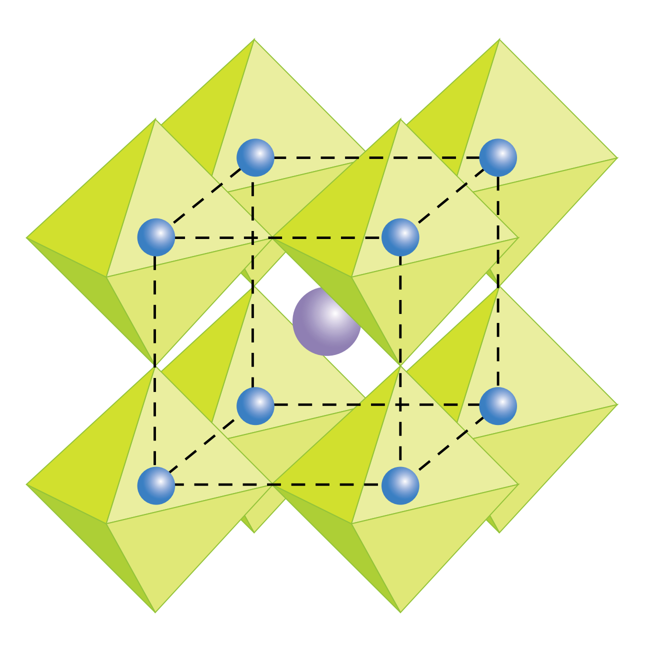
1. COMPORTAMIENTO DEL ELECTRON, en conducción metálica (*izquierda*) y polarónica (*derecha*). En un fenómeno de conducción metálica, la función de ondas del electrón (e^-) está deslocalizada, es decir, el electrón puede desplazarse por todo el material; el movimiento del electrón sufre sólo una influencia ligera por los iones que forman dicho material (*A* y *B*). La energía potencial que tiene el electrón es periódica, del tipo mostrado en la parte inferior de la figura, con mínimos de energía (*círculos naranja*) a lo largo de todo el material. V(x) representa la energía potencial que crean los iones y x es la posición del electrón (se dice que el e^- se mueve en una banda). Si el electrón queda transitoriamente localizado en alguna posición atómica, debido a que de este modo se minimiza la energía del conjunto formado por el electrón y los iones de la red, se produce un reacomodo de las posiciones iónicas circundantes. Físicamente esto da lugar a que el electrón quede localizado en un pozo de energía potencial. De esta manera se forma un polarón de red, que se compone del electrón localizado y la distorsión de la red asociada. El polarón puede moverse hacia posiciones vecinas equivalentes mediante dos mecanismos: a alta temperatura está favorecido el salto (*hopping*) debido a la energía térmica, proporcional ésta a la temperatura, y a baja temperatura está favorecido el efecto túnel (*tunnelling*) cuántico.

+3 para que haya neutralidad de carga (cada ion de oxígeno atrapa 2 electrones, es decir, presenta valencia –2: O^{-2}), mientras que en uno del tipo $(A^{+2})MnO_3$ el ion de Mn presenta valencia +4. En un compuesto mezcla $(TR_{1-x}^{+3}\,A_x^{+2})MnO_3$, coexisten los dos tipos de iones Mn. La coexistencia de iones Mn^{+4} y Mn^{+3} es la responsable de que puedan formarse polarones magnéticos, denominados así porque, además de exhibir las propiedades de un polarón de red, poseen un carácter magnético. En razón de ese carácter magnético, el movimiento de los polarones se ve afectado por la acción de un campo magnético externo; cuando eso acontece, se origina el fenómeno de magnetorresistencia, en virtud del cual varía la resistencia eléctrica al aplicar un campo magnético.

En los metales, la aplicación de un campo magnético apenas hace variar la resistividad. Debido a la fuerza de Lorentz, su efecto se limita a confinar con cierta soltura a los electrones de conducción en órbitas que giran alrededor del campo magnético. (Así llamada en honor de Hendrik Antoon Lorentz, esa fuerza es función de la carga y velocidad electrónicas y de la inducción magnética.) Si un campo magnético rebaja la resistividad de un material a la mitad, se entiende que ese material presenta magnetorresistencia gigante. En los óxidos de manganeso puede disminuirse la resistividad, en varios órdenes de magnitud, mediante la aplicación de un campo magnético. Para este fenómeno S. Jin, de los laboratorios Bell, acuñó la expresión de magnetorresistencia colosal.

Como es sabido, el magnetismo está producido por partículas elementales. El magnetismo del núcleo (causado por protones y neutrones) adquiere significación sólo a muy bajas temperaturas, cercanas a los cero grados kelvin. Al alejarnos del cero absoluto de temperatura, los electrones son entonces los responsables de las propiedades magnéticas. Cuando un electrón, que es una partícula cargada, gira alrededor de un núcleo, produce un campo magnético microscópico. La suma de los efectos de todos los electrones que giran en torno a un ion engendra el momento magnético orbital del ion, un campo magnético microscópico.

Además, debido a un efecto cuántico, los electrones (al igual que los protones y los neutrones) presentan un momento magnético intrínseco llamado espín, que sólo puede tener dos orientaciones, comúnmente llamadas "arriba" y "abajo". De este modo, un electrón de conducción presenta un momento magnético de espín e interacciona magnéticamente con los iones de la red, que poseen momento magnético orbital y de espín.



2. LA ESTRUCTURA CRISTALOGRAFICA de los óxidos de la forma $(TR_{1-x}A_x)MnO_3$ es del tipo perovskita. (TR designa un ion de tierra rara; A, un catión divalente.) Los átomos de Mn se sitúan en los vértices de un cubo y están rodeados de 6 oxígenos que forman un octaedro a su alrededor. En el centro del cubo se encuentra el ion TR o A. Los compuestos que muestran magnetorresistencia gigante, como por ejemplo $(La_{2/3}Ca_{1/3})\,MnO_3$, tienen una estructura cristalográfica algo diferente, con los octaedros MnO_6 ligeramente girados, lo cual hace bajar la simetría de cúbica a ortorrómbica.

Los iones Mn^{+3} y Mn^{+4} poseen girando a su alrededor, respectivamente, 4 y 3 electrones en los orbitales 3d. Los iones de oxígeno, dotados de carga negativa puesto que han atrapado dos electrones, crean sobre los iones de manganeso un campo eléctrico cristalino que desdobla los niveles de energía de los electrones 3d en un triplete (que acomoda tres electrones de igual espín) y un doblete (que puede acomodar hasta dos electrones de igual espín) de mayor energía. El ion Mn^{+3} tiene ocupado el triplete y el cuarto electrón lo acomoda en el doblete (de aquí en adelante, electrón e_g). Por su parte el ion Mn^{+4} acomoda sus tres electrones en el triplete y deja libre el doblete.

Los electrones que ocupan el triplete están confinados en los iones de manganeso y no participan en la conducción eléctrica. Por contra, el electrón e_g goza de movilidad, puesto que el enlace Mn-O-Mn tiene un carácter covalente (es decir, existe un solapamiento de los orbitales electrónicos de los iones Mn y O) y el electrón e_g puede pasar, a través de los orbitales electrónicos del oxígeno, de un ion de Mn a otro vecino que tenga vacío el doblete. El electrón e_g es el que participa en la conducción eléctrica; su mayor o menor movilidad determina la resistencia eléctrica del material.

Además, la transferencia del electrón e_g entre iones de Mn vecinos da lugar a un acoplamiento ferromagnético —los momentos magnéticos apuntan en la misma dirección— entre los momentos magnéticos de los iones de Mn. Se produce esta interacción ferromagnética, llamada de doble canje, porque existe un fuerte acoplamiento intraatómico que hace que, dentro de cada ion de manganeso, todos los espines de los electrones se encuentren alineados entre sí. Cuando el electrón e_g se transfiere a un Mn vecino, conserva la dirección de su espín e intenta alinear en la misma dirección el momento magnético de este ion. Cuanto mayor es el alineamiento de los momentos magnéticos de los iones Mn, con tanta mayor facilidad se transfiere el electrón e_g.

En este tipo de óxidos de manganeso hemos observado que se forman polarones de red al quedar temporalmente localizados los electrones e_g en torno a iones de Mn, fenómeno que origina una conducción polarónica. Al ser el electrón e_g también mediador de la interacción magnética, el polarón de red adquiere un carácter magnético.

En consecuencia, el polarón magnético consiste en un electrón localizado, que porta asociadas una deformación elástica y una polarización ferromagnética del entorno del electrón (una nube magnética que acompañará al electrón en su movimiento). Se trata, pues, de una nueva entidad dentro de la física del

estado sólido (aunque con el mismo nombre, el polarón magnético descrito en semiconductores magnéticos presenta propiedades diferentes).

Nuestra aportación al conocimiento de estos sistemas se ha centrado, por un lado, en presentar pruebas experimentales de la existencia de los polarones magnéticos en la fase paramagnética de los óxidos de Mn que exhiben magnetorresistencia (gigante y colosal) y su desaparición en la temperatura de orden ferromagnético (la fase paramagnética, en la que los momentos magnéticos están orientados al azar, tiene lugar a temperaturas superiores a la de orden magnético). Además, hemos descubierto que existe una correlación entre los fenómenos magnetorresistivos en estos materiales y el efecto que el campo magnético produce sobre los polarones magnéticos.

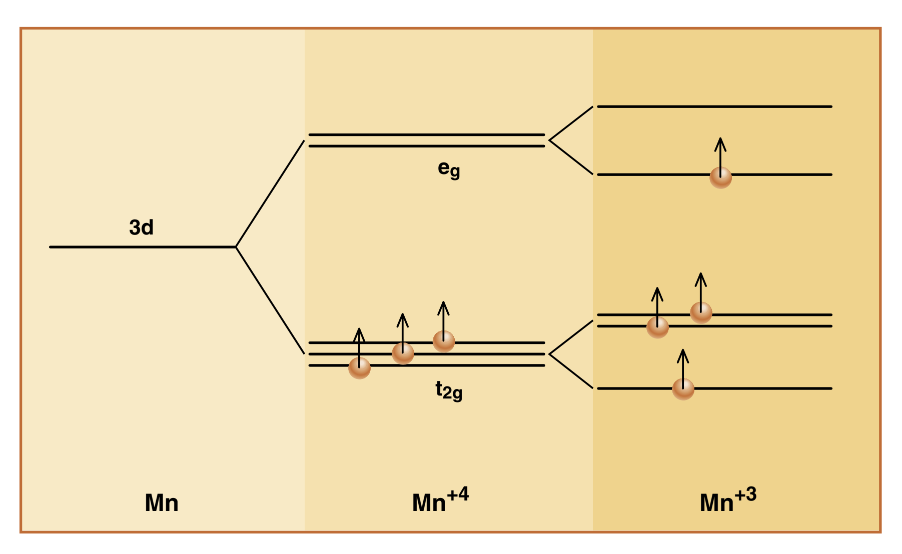
La existencia de polarones de red en estos compuestos se pone de manifiesto en la variación, con la temperatura, de la resistencia eléctrica y del volumen. Si enfriamos el metal desde alta temperatura, se observa que la resistencia crece, tal y como es de esperar en conducción polarónica. Se advierte, además, que el volumen es anormalmente elevado debido a la deformación elástica asociada al polarón. Se llama temperatura de Curie (T_c) la temperatura en que se produce orden ferromagnético de largo alcance, esto es, cuando todos los momentos magnéticos del material apuntan en la misma dirección. Pues bien, a la temperatura de Curie desaparecen los polarones, lo que comporta que la resistividad disminuya en picado y el volumen recupere su estado normal.

Por debajo de T_c la conducción es metálica, por una sencilla razón: el electrón e_g se transfiere fácilmente entre iones de Mn, al presentar éstos sus momentos magnéticos paralelos y no ser posible la formación de polarones. El fenómeno de magnetorresistencia gigante (y colosal) asociado a la existencia de polarones magnéticos ocurre en la fase paramagnética ($T > T_c$) debido a que la aplicación de un campo magnético tiende a dejar sueltos ("deslocalizar") los electrones e_g, destruyendo los polarones. Al medir la resistencia y el volumen bajo un campo magnético aplicado, se observa que los fenómenos asociados a la existencia de polarones tienden a desaparecer.

Para poner de manifiesto el carácter magnético del polarón realizamos diversos experimentos. La susceptibilidad magnética nos da información de cómo se orientan los momentos magnéticos del material al aplicar un campo magnético. Si los momentos magnéticos estuviesen orientados al azar, el inverso de la susceptibilidad debería seguir un comportamiento lineal. Pues bien, de acuerdo con nuestras observaciones, a la temperatura a la que empiezan a manifestarse los efectos elásticos asociados a los polarones el inverso de la susceptibilidad comienza a desviarse del comportamiento lineal; ese fenómeno nos revela que se forman nubes magnéticas en cuyo interior están alineados entre sí los momentos magnéticos.

Para obtener información acerca del tamaño de los polarones magnéticos solicitamos la realización de un experimento de difracción de bajo ángulo de neutrones en el reactor nuclear del Instituto Laue Langevin de Grenoble. Esta técnica experimental permite detectar la estructura periódica de entidades de unos 10 angström. Esa resolución nanométrica explica por qué su uso habitual es en biología (en determinación de estructuras de proteínas, ácidos nucleicos, etc.). Ahora bien, al tener el neutrón un momento magnético intrínseco, esta técnica permite también medir el tamaño de entidades del tipo de los polarones magnéticos.

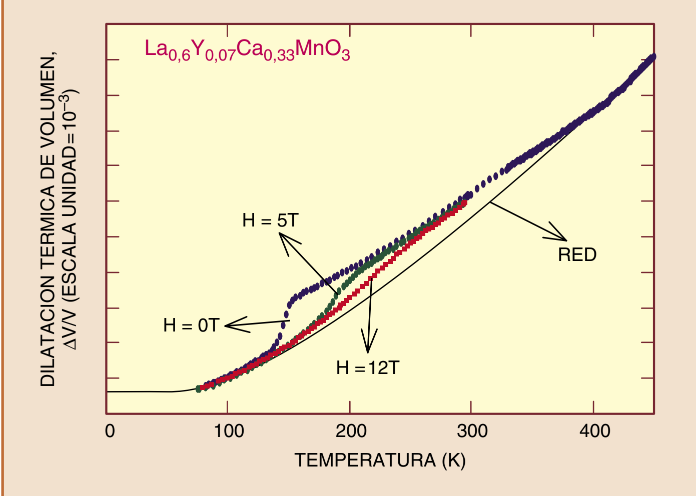
El experimento entrañaba cierta dificultad. Nos proponíamos estudiar la evolución del tamaño del polarón conforme variaran la temperatura y el campo magnético. Pero el instrumento del Laue-Langevin está proyectado para investigaciones biológicas, donde no se necesita medir en función de esas variables. Hubo, pues, que adaptarlo a nuestros fines. Instalamos un crioimán, que nos permitió medir desde la temperatura del helio líquido (4,2 grados kelvin) hasta la temperatura ambiente y con campos magnéticos aplicados de hasta 5 teslas (el campo magnético terrestre, que orienta las brújulas, es de 0,00005 teslas).



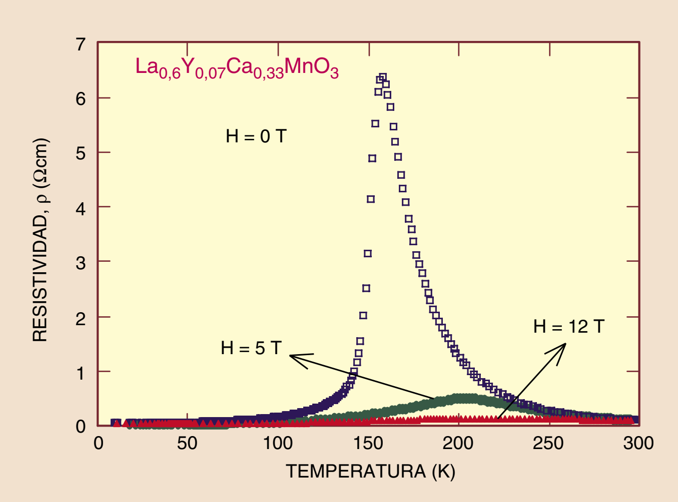
3. CUANDO UN ATOMO DE Mn (en general cualquier elemento) pasa a formar parte de un compuesto sólido, pierde sus electrones externos, cuyo número constituye la valencia del átomo. En el caso de los compuestos de la forma $(TR_{1-x}A_x)MnO_3$, los átomos de Mn presentan valencia +3 y +4, dependiendo su porcentaje relativo del valor de x. Por tanto, el ion de Mn queda con capas electrónicas cerradas como el gas noble argón, más 4 o 3 electrones pertenecientes a la capa electrónica 3d a su alrededor. Puesto que los iones de Mn están rodeados de iones dotados de carga eléctrica, éstos crean un campo eléctrico cristalino sobre el Mn, desdoblando los niveles energéticos de tipo 3d. Aparece un triplete de menor energía, llamado t_{2g}, y un doblete de mayor energía, denominado e_g. Cada subnivel puede acomodar dos electrones de espines opuestos, aunque los electrones tienden a colocarse con espines paralelos (cada electrón está representado por una flecha cuya dirección indica la dirección del espín del electrón). En el ion Mn^{+4} los tres electrones se colocan en el nivel t_{2g}, teniendo vacío el nivel e_g. En el caso del ion Mn^{+3} el cuarto electrón se sitúa en el nivel e_g, siendo este electrón el responsable de la conducción eléctrica. La transferencia del electrón e_g entre iones Mn^{+3} y Mn^{+4} origina una transferencia de la carga y al mismo tiempo es responsable de la interacción magnética de doble canje.

Modificación de las propiedades en función de la temperatura

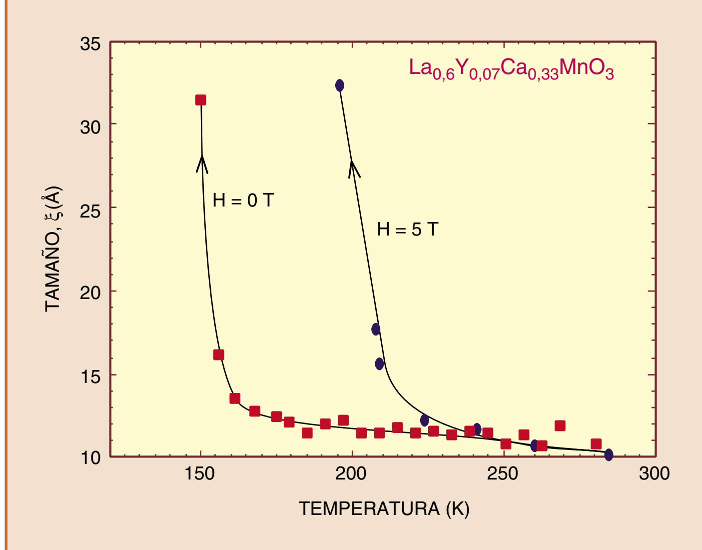
Con la aplicación de campos magnéticos y en función de la temperatura compuestos con magnetorresistencia gigante, como $(La_{0,6}Y_{0,07}Ca_{0,33})MnO_3$, ven alteradas sus propiedades.



1. Dilatación térmica del volumen, ΔV/V, en función de la temperatura bajo campos magnéticos aplicados de 0, 5 y 12 teslas. Sin campo aplicado, se observa un efecto asociado a la conducción polarónica: una deformación del volumen, contribución que se suma a la dilatación térmica esperada en conducción metálica, que se ha llamado “red” en la figura. Al aplicar campo magnético estos efectos tienden a desaparecer ya que se destruyen los polarones.



2. Resistividad (resistencia por unidad de sección y longitud), ρ, expresada en unidades de ohms × centímetro, correspondiente al compuesto anterior. En ausencia de campo se produce también otro efecto asociado a la conducción polarónica: incremento de la resistencia al disminuir la temperatura. En presencia de un campo magnético desaparece dicho efecto y la conducción pasa a ser metálica.



3. Longitud de correlación magnética, ξ medida en angström, en función de la temperatura sin campo y con campo magnético aplicado (H) de 5 teslas, obtenida de los experimentos de difracción de neutrones de bajo ángulo realizados en el reactor nuclear del ILL de Grenoble. ξ denota el tamaño del polarón magnético, que es de algo más de 10 angström (unos dos parámetros de red) por debajo de la temperatura ambiente. Al alcanzar la temperatura de orden magnético los polarones desaparecen al fusionarse unos con otros, lo cual se refleja en el brusco incremento de la longitud de correlación, que ocurre a 150 grados kelvin sin campo aplicado y a 190 grados para un campo de 5 teslas.

Los experimentos nos llevaron a establecer que el polarón medía unos 12 angström (una celda unidad del material tiene unos 6 angström de lado) y dependía ligeramente de la temperatura. El polarón existe desde altas temperaturas hasta T_c, temperatura a la que se produce el orden ferromagnético en todo el material y, por tanto, desaparecen los polarones. Se presenta simultáneamente una transición de un estado de alta resistencia a otro de baja resistencia: una transición de aislante a metal.

Hemos observado también que, a altas temperaturas, el tamaño del polarón no varía sustancialmente con el campo magnético aplicado. Mas a temperaturas próximas a T_c, donde ocurren los fenómenos de magnetorresistencia, el campo magnético provoca el crecimiento de los polarones. Un campo magnético suficientemente intenso produce una fusión de unos polarones con otros, estableciéndose el orden ferromagnético en todo el material.

¿Cómo representarnos un polarón magnético? Un electrón e_g, confinado sobre un Mn, forma un ion Mn^{+3} y se produce una distorsión de volumen del entorno. Este electrón visita rápidamente, en menos de una milmillonésima de segundo, los Mn^{+4} vecinos, que tienen vacío el doblete y, por tanto, pueden acomodarlo allí. Debido a la interacción de doble canje se produce un ordenamiento paralelo de los momentos magnéticos de todos estos iones Mn, creándose una pequeña nube magnética. En todo el material se generan nubes de este tipo, en cuyo interior hay orden magnético aunque se hallan orientados al azar unos respecto de otros. Si aplicamos un campo magnético, las nubes magnéticas crecen en tamaño y pueden llegar a fusionarse unas con otras, desembocando en un ordenamiento ferromagnético. Esto mismo se produce de modo espontáneo en T_c.

4. REPRESENTACION ESQUEMATICA de un material magnetorresistivo donde se forman polarones magnéticos. Los polarones magnéticos permanecen en una misma posición un tiempo superior a 10^{-5} segundos para posteriormente desplazarse a posiciones vecinas. Cada polarón magnético consta, al menos, de un ion Mn^{+3}, donde se halla confinado un electrón e_g, y varios iones Mn^{+4} que le rodean; los momentos magnéticos de estos iones Mn apuntan todos en la misma dirección. El electrón e_g se transfiere rápidamente ($t < 10^{-9}$ segundos) entre el ion Mn^{+3} y los Mn^{+4}.

Con el fin de comprobar que la magnetorresistencia gigante se debía al efecto del campo magnético sobre los polarones magnéticos procedimos a estudiar la dependencia, con el campo magnético, de todas las propiedades físicas de interés en estos sistemas a temperatura constante: volumen, resistencia, imanación y longitud de correlación magnética. (La imanación refleja el grado de alineamiento de los momentos magnéticos de todo el material y la longitud de correlación magnética es equivalente en nuestro caso al tamaño del polarón magnético.)

A 10 grados kelvin por encima de T_c, donde la magnetorresistencia adquiere valores elevados, se comprueba que, para el mismo campo crítico de 1 tesla, advienen una brusca disminución del volumen y de la resistencia, así como un incremento drástico de la imanación y del tamaño del polarón. Todos estos fenómenos van asociados a la aplicación de un campo magnético, que aumenta la movilidad del electrón e_g. Pasa éste de hallarse localizado en nubes magnéticas cada vez mayores a encontrarse libre del todo en el material cuando se produce la fusión entre nubes (al campo de 1 tesla). La conducción se convierte entonces en metálica.

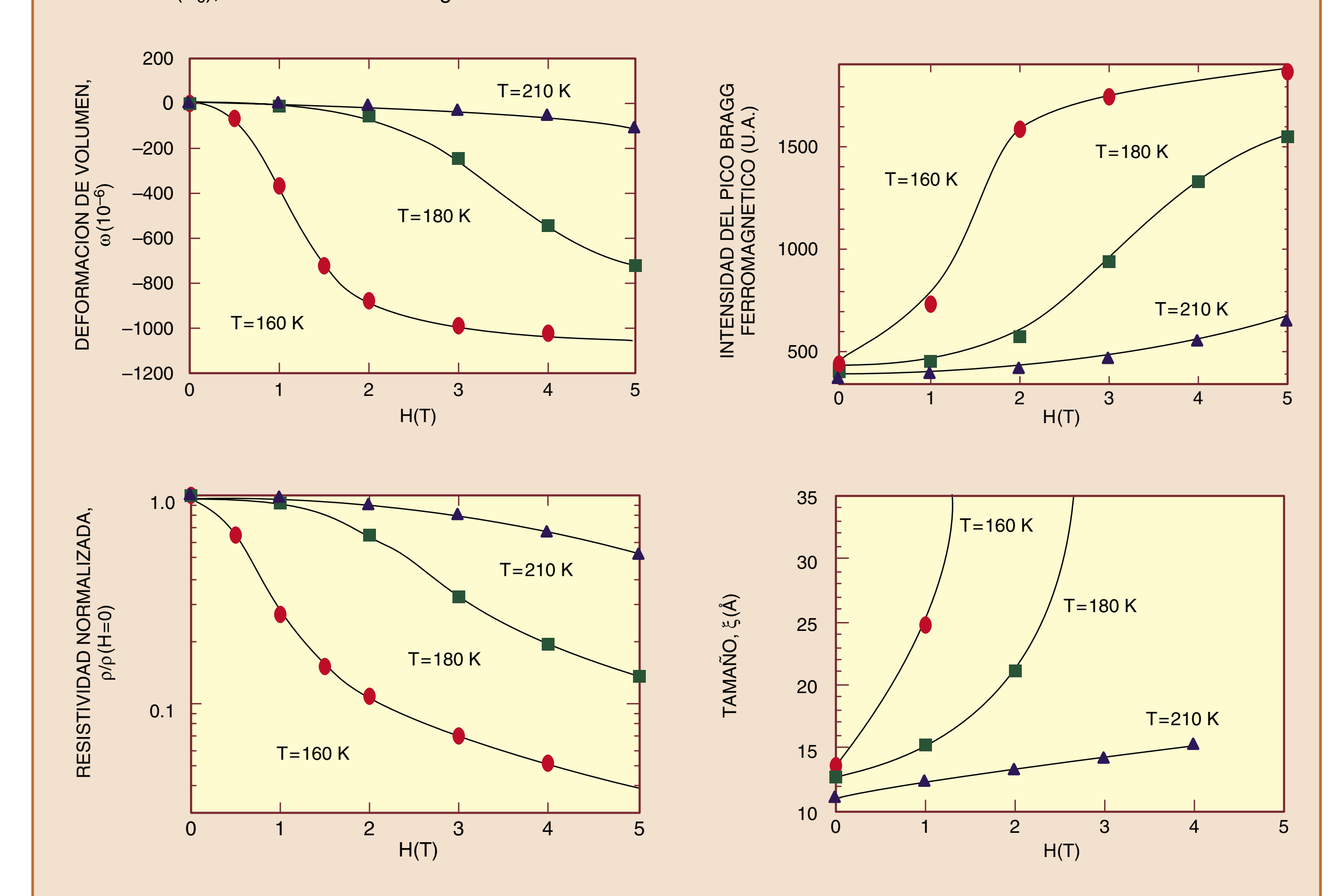
Uno de los efectos más espectaculares que acompañan a la formación de polarones de red en estos compuestos es la existencia de un extraordinario efecto isotópico. Si en vez de preparar los compuestos en atmósfera de aire, donde el isótopo ^{16}O (8 neutrones y 8 protones) es el más abundante (y, por tanto, los átomos de oxígeno del material tendrán mayoritariamente este tipo de núcleo), se preparan en una atmósfera especial de ^{18}O (10 neutrones y 8 protones), podremos estudiar la influencia que el cambio de la masa de estos átomos ejerce en las propiedades físicas del material.

A nosotros nos interesa sobremanera la resistencia eléctrica del material, propiedad que, en principio, no debería depender de la masa de los núcleos, puesto que en la conducción se desplazan los electrones y no los núcleos. Lo cierto es que, cuando se trata de materiales con conducción metálica, el cambio isotópico no produce variaciones significativas en la resistividad. Sin embargo, en nuestros óxidos de manganeso la conducción es de tipo polarónica, lo que precisa la existencia de un fuerte acoplamiento del electrón con las vibraciones de la red; por consiguiente, un cambio en la masa de los núcleos que están vibrando sí podría modificar las propiedades eléctricas.

En efecto, al medir la temperatura de la transición de aislante a metal en el compuesto $La_{2/3}Ca_{1/3}MnO_3$ se observa un desplazamiento de 10

Modificación de las propiedades en función del campo magnético

Las magnitudes físicas de compuestos con magnetorresistencia gigante, como $(La_{0,6}Y_{0,07}Ca_{0,33})MnO_3$, cambian en función del campo magnético aplicado cuando se encuentran a temperaturas fijas superiores a la temperatura de Curie (T_c), en este caso 150 grados kelvin.



Los mayores efectos magnetorresistivos tienen lugar a temperaturas próximas a la de Curie, observándose a 160 grados kelvin que, para un campo crítico de ≈1 tesla, desaparece la distorsión de la red (ω) asociada a la formación de polarones, cae abruptamente la resistividad ($\rho/\rho(H=0)$) y el tamaño de los polarones pasa de ser de 14 angström a campo cero a divergir. Si nos fijamos en la intensidad de un pico Bragg ferromagnético (que es proporcional a la imanación) observamos una transición metamagnética a aproximadamente 1 tesla; ello comporta que los polarones se fundan unos con otros y se produzca orden ferromagnético de largo alcance.

grados kelvin al sustituir el ^{16}O por ^{18}O.

En $(La_{0,5}Nd_{0,5})_{2/3}Ca_{1/3}MnO_3$ hemos encontrado que el compuesto preparado con ^{16}O presenta una transición de aislante a metal a 125 grados kelvin, mientras que el mismo compuesto con ^{18}O es aislante en todo el rango térmico. Dicho de otro modo, basta cambiar la masa del núcleo, para que la resistencia del compuesto se altere en más de cinco órdenes de magnitud, nada menos.

Parece increíble que una pequeña modificación de las características del núcleo de uno de los elementos constituyentes del material provoque una modificación tan drástica de las propiedades electrónicas. En ningún material se había observado nunca semejante fenómeno. Tal como nosotros lo entendemos, ésta es la explicación: al introducir un núcleo más pesado, las vibraciones de la red (en concreto las del octaedro MnO_6) son más lentas, de forma que el electrón e_g se transfiere más despacio entre los átomos de Mn, perdiendo movilidad y, por tanto, aumenta la resistencia.

Se ha sugerido que, en los superconductores basados en óxidos de cobre, con una estructura cristalográfica similar a la de los óxidos de manganeso mencionados, sus propiedades de transporte características pueden deberse a un mecanismo de segregación dinámica de fases electrónicas parecido al que ocurre en los materiales magnetorresistivos. (Por segregación dinámica de fases electrónicas se entiende que no todo el material es electrónicamente homogéneo: un polarón representa una heterogeneidad sobre una matriz homogénea.)

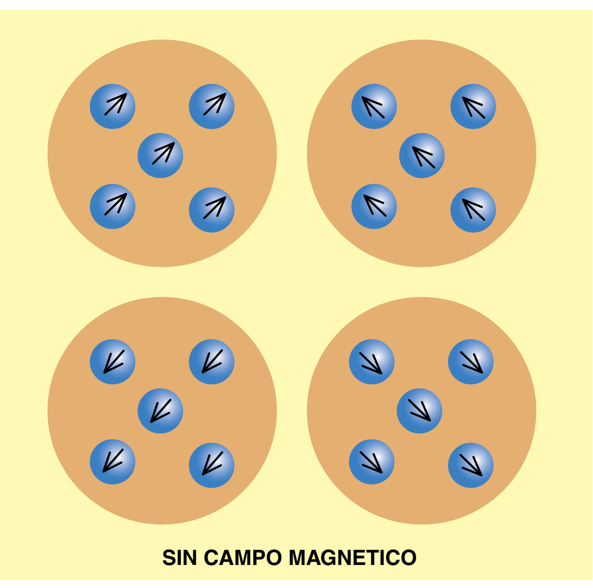
Por debajo de la temperatura de transición al estado superconductor se forman parejas electrónicas (pares de Cooper), ligadas por un mecanismo todavía desconocido, que se desplazan libremente por el material sin que ningún obstáculo altere su movimiento. El grupo de K.

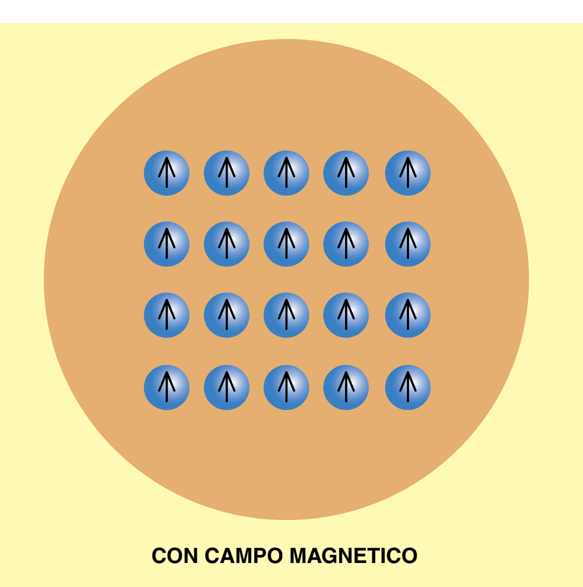
A. Müller, quien recibió el premio Nobel de física de 1988 junto con J. G. Bednorz por el descubrimiento de la superconductividad de alta temperatura, ha obtenido, a partir de experimentos de cambio isotópico, pruebas de la formación de portadores polarónicos por encima de la temperatura de transición al estado superconductor. Tales portadores, constituidos por la carga más la distorsión de la red, que se condensarían en pares de Cooper, harían posible la existencia de conducción con resistencia nula.

Si desde un punto de vista teórico los óxidos de manganeso magnetorresistivos resultan muy sugestivos, su aplicación técnica no les anda a la zaga. Los materiales magnetorresistivos se emplean en circuitos electrónicos que requieren esta propiedad. La aplicación más prometedora de los materiales magnetorresistivos, y también la más demandada, es su uso en cabezas lectoras magnéticas. La industria del almacenamiento magnético (vídeos, radiocasetes, discos duros de ordenador, etc.) mueve anualmente del orden de 10 billones de pesetas.

En una cinta magnética la información se almacena en dominios magnéticos (pequeñas regiones ferromagnéticas) que crean un campo magnético y que, al pasar bajo la cabeza lectora, alteran la resistencia del circuito y producen una señal eléctrica. En una cabeza lectora "clásica" este circuito consta de una bobina que capta una variación de flujo magnético. El rango usual de campos magnéticos producidos por los dominios es de 0-20 oersted (1 oersted equivale a 0,0001 tesla) para las densidades típicas actuales de almacenamiento. Si se quiere tener almacenada en el mismo espacio mayor cantidad de información, hay que reducir el tamaño de los dominios magnéticos, con lo que el campo magnético que producirán será menor.

Si en la cabeza lectora incluimos un circuito elaborado con material magnetorresistivo se logran prestaciones muy superiores, dada su alta sensibilidad para detectar variaciones de campo magnético. Cuanto más sensible sea el material magnetorresistivo, menores serán los dominios necesarios y mayor la información que se lee por unidad de tiempo. R. Coehoorn, de la empresa Philips, ha anunciado el desarrollo de una cabeza prototipo para grabación digital en cintas magnéticas basada en multicapas con magnetorresistencia gigante, que opera con señales de salida diez veces mayores que las de las cabezas actuales. Estos materiales pueden encontrar también aplicación entre los sensores magnéticos para la industria del automóvil y aeroespacial, medicina, vigilancia y seguridad, control de calidad, etc. También se trabaja en poner a punto la memoria de acceso aleatorio magnetorresistiva (MRAM) que permitirá almacenar 1 megabit de información en microcircuitos pequeños.

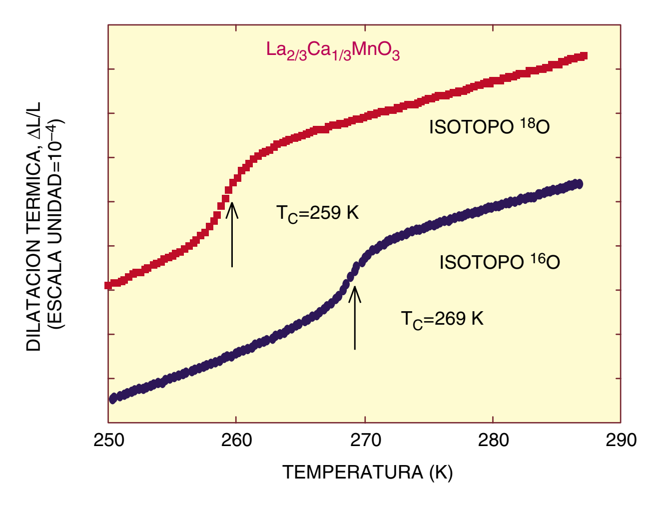


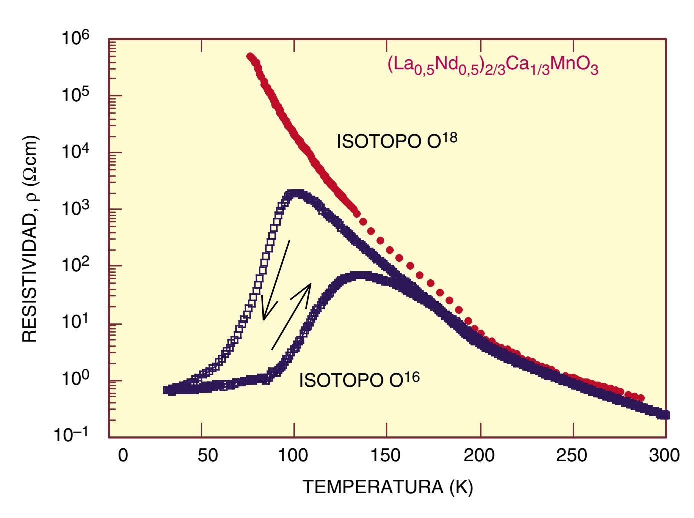


5. CAMPO Y POLARON MAGNETICO. Sin campo magnético, los polarones tienen un tamaño del orden de una decena de angström; dentro de cada polarón, los momentos magnéticos apuntan en la misma dirección y están orientados al azar unos respecto de otros. Al aplicar un campo magnético a temperaturas próximas a la de Curie del material, los polarones se orientan en la dirección del campo magnético y se funden unos con otros, apareciendo orden magnético de largo alcance y pasando la conducción de polarónica a metálica.

Los materiales que recientemente han atraído más interés por sus características magnetorresistivas son las multicapas de metales de transición y los óxidos de manganeso. Hace unos diez años, P. Grünberg, del Centro Jülich de Investigación, estudió una estructura metálica en forma de sandwich, con dos capas de hierro separadas por otra de cromo. En su trabajo comprobó que, si mantenía una corriente eléctrica constante a través del sandwich, la resistencia cambiaba al aplicar un campo magnético. No se trataba de ningún cambio espectacular. Pero cuando dos años después A. Fert, de la Universidad de París Sur, consiguió un cambio del 50 % en la resistencia de 40 capas de hierro alternadas con finísimas capas de cromo, AT&T, IBM, Philips, Thomson y otras empresas de tecnología punta se lanzaron al estudio de la magnetorresistencia en multicapas (cada capa tiene típicamente decenas de angström), esperándose los primeros productos para el cambio de siglo.

Para que un material magnetorresistivo halle acomodo en la industria, es necesario que presente magnetorresistencia gigante a temperatura ambiente y a bajo campo magnético. En los laboratorios Bell han ideado un modo de aumentar la magnetoresistencia de óxidos de Mn con temperatura de Curie próxima a la ambiental colocándolos entre dos piezas de un material ferromagnético blando, cuya imanación es muy ele-





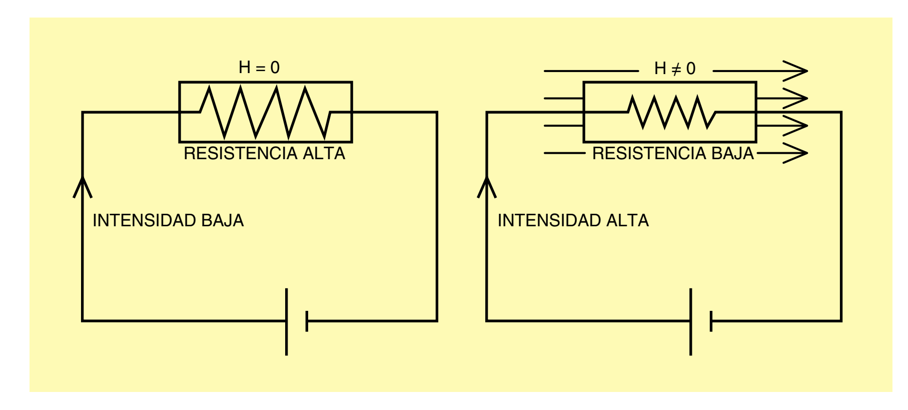
6. CUANDO SE PREPARAN los óxidos magnetorresistivos en atmósfera enriquecida de ^{18}O (frente a la típica preparación en atmósfera de aire, en la que el isótopo ^{16}O es el más abundante) se observan notables diferencias en el comportamiento eléctrico y magnético del material. En el compuesto $(La_{2/3}Ca_{1/3})MnO_3$ se comprueba, a través de las mediciones de dilatación térmica, que la anomalía de volumen asociada a la transición de aislante a metal se desplaza 10 grados kelvin con el cambio isotópico. En el compuesto $(La_{1/3}Nd_{1/3}Ca_{1/3})MnO_3$ se observa el efecto más espectacular: a 50 grados kelvin la resistividad del compuesto preparado con ^{18}O supera en más de 6 órdenes de magnitud la resistividad del compuesto preparado con ^{16}O.

vada a bajo campo magnético. Al aplicar un pequeño campo magnético, éste se intensifica por el material ferromagnético blando y aumenta de forma espectacular la magnetorresistencia del óxido. La Universidad de Maryland sigue otra línea de investigación, que se apoya en el efecto Meissner de los superconductores. Si se coloca el material en el centro de un anillo superconductor, que repele las líneas de campo magnético, éstas se concentran en el centro, actuando como lente magnética. Los equipos de A. Fert, en la Universidad de París Sur, y A. Gupta, en IBM, han preparado multicapas basadas en los óxidos de Mn magnetorresistivos, consiguiéndose resultados óptimos.

Hasta ahora, los sistemas electrónicos se han basado en dispositivos creados con materiales semiconductores, que hacen uso de la carga electrónica de cierto número de electrones. Sin embargo, no se había prestado atención al espín del electrón. Pero se ha avanzado ya bastante en el desarrollo de técnicas que permiten preparar y caracterizar materiales a escala nanométrica. Se abren así nuevas perspectivas para la magnetoelectrónica, dominio que combina el magnetismo con las propiedades de la electrónica tradicional y que se basa en los materiales magnetorresistivos.

Las principales ventajas de la utilización de tales materiales estriban en el número de electrones implicados en la conducción (mucho mayor en los materiales magnetorresistivos) y en la escala de longitud de las interacciones magnéticas (mucho menores que en los semiconductores), lo que reviste especial interés para la miniaturización de dispositivos e incremento de la densidad de almacenamiento de la información.

Parafraseando a S. Jin, con una ley de Ohm según la cual la diferencia de potencial es igual a la resistencia por la intensidad y donde la resistencia puede modificarse en varios órdenes de magnitud con un pequeño campo magnético, el mundo de la electrónica puede experimentar una transformación completa.



7. EFECTO de la magnetorresistencia gigante sobre la ley de Ohm. Para una diferencia de potencial determinada, podemos modular la resistencia del material aplicando un mayor o menor campo magnético.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MAGNETOELECTRONICS. G. Prinz y K. Hathaway, en *Physics Today*, volumen 48, n.º 4, págs. 24-25; 1995.

MULTILAYERS AND PEROVSKITES REWRITE RULES OF RESISTANCE. A. Hellemans, en *Science*, volumen 273, páginas 880-881; 1996.

NEW FORMS OF PHASE SEGREGATION. J. B. Goodenough y J.-S. Zhou, en *Nature*, volumen 386, páginas 229-230; 1997.

EVIDENCE FOR MAGNETIC POLARONS IN THE MAGNETORESISTIVE PEROVSKITES. José M. de Teresa, M. R. Ibarra García, P. A. Algarabel, C. Ritter, C. Marquina, J. Blasco, J. García, A. del Moral y Z. Arnold, en *Nature*, volumen 386, páginas 256-259; 1997.

Shawn Carlson

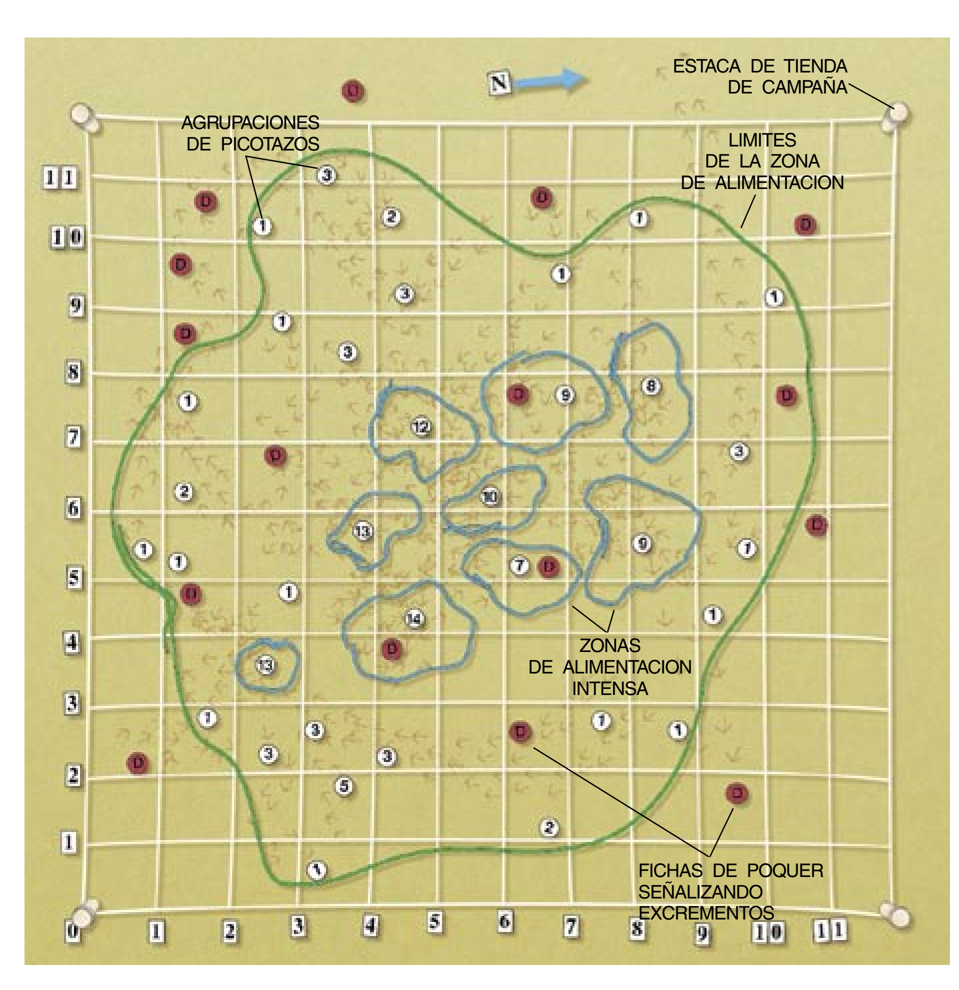
Seguimiento numérico de las aves

Gracias a un feliz accidente de la geografía, tengo la suerte de vivir en un paraíso soñado por los observadores de aves. En mi lugar de residencia, cerca de la californiana San Diego, ponen pie numerosas especies del Norte y del Sur en su vuelo migratorio por la costa del Pacífico. Cuento por centenares las especies exóticas que hacen escala en la zona.

Año tras año, me las arreglo para observar la llegada de zarapitos, agujetas jaspeadas y zarapitos picudos. Vienen del Canadá y les disputan el territorio a las aves costeras residentes de San Diego. A ese trío fascinante, mi favorito, le he consagrado muchísimas horas, mañanas enteras, para descubrir los secretos sutiles de su comportamiento. Hinco en la playa mi pequeño laboratorio. Para extrañeza de curiosos, me abalanzo presuroso hacia el lugar donde una bandada acaba de alimentarse, para medir sus picoteos, pisadas y excrementos.

Semejante escrutinio activo, que pretende cuantificar pautas de comportamiento, no genera entusiasmo entre la legión de observadores pasivos de binoculares prendidos al cuello. Mas para discernir relaciones complejas, el naturalista debe realizar mediciones numéricas y tabular los resultados. Así procede la ciencia. Son pocos, sin embargo, los aficionados conscientes de que podrían contribuir aún más al progreso del conocimiento de la naturaleza si cuantificaran sus observaciones. Dedicaremos el tema del mes a la observación ornitológica tamizada por números.

Las técnicas ofrecidas tienen alcance general. Valen para las aves de cualquier región e incluso, ligeramente modificadas, para otros organismos. Comparando las observaciones sobre especies diferentes, los aficionados podrían desgajar pautas de conducta que se generaron recientemente de otras que surgieron con la aparición de las aves, hace unos 100 millones de años [*véase* "El origen de las aves y su vuelo", por Kevin Padian y Luis M. Chiappe, *en este mismo número*].



El comedero de una bandada de aves costeras puede cartografiarse empleando una red de pesca como cuadrícula

Empezaremos por estudiar los rastros dejados en el suelo. Para determinar la ubicación relativa de esas señales, nada mejor que emplear una retícula portátil. Aunque ésta facilita mucho la representación del emplazamiento sobre un hoja de papel, resulta más apropiada una cámara. Podrá recogerse información más eficazmente si fotografiamos emplazamientos interesantes para anotar luego las observaciones en un cuaderno tras haber revelado las fotos.

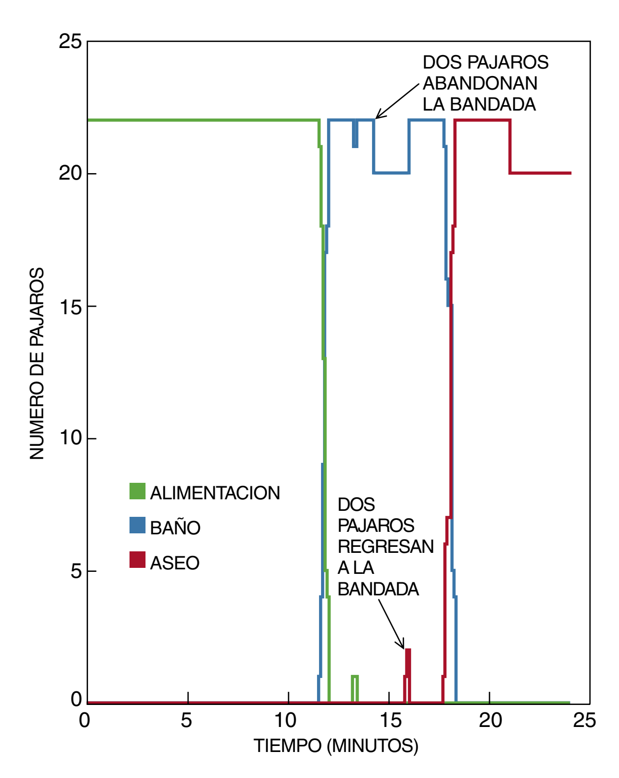
En beneficio de la precisión, conviene leer en las fotos la posición de los datos con gran cuidado empleando una regla. No usaremos cámaras que proyecten en nuestras fotografías una imagen de su propia retícula interna. Esa retícula tiene siempre el mismo tamaño sobre la película, cual-

quiera que sea la distancia al objeto, y, por tanto, se complicaría la comparación entre distintas fotos de un mismo lugar tomadas desde puntos diferentes.

Un red de pesca de nailon de malla rómbica es ideal. Estirándola podremos crear aberturas cuadradas. La extensión de la zona a reconocer dictará la medida adecuada de la malla. Por ejemplo, si pretendemos estudiar zonas de unos pocos metros cuadrados, con una red de una malla de cinco centímetros y de unos tres metros de lado trabajaremos perfectamente. La pintaremos por rociado con un color que resalte bien en las fotos. Luego, ya en el campo, se sujetará una de las esquinas con una estaca de tienda de campaña. Después, nos valdremos de una escuadra para cuadrar la malla al apuntalar las tres esquinas restantes.

Para evidenciar las coordenadas de la cuadrícula, compraremos en la ferretería un juego de números, como los que se emplean para identificar las casas de una calle. Con esos rótulos numeraremos los ejes vertical y horizontal; se habrán de ver en las fotografías. La separación entre números depende de las dimensiones del emplazamiento. Se juntarán (separados dos o tres unidades de malla) si el emplazamiento es pequeño y más alejados (cinco o más unidades de malla) si la zona a observar es mayor. Nunca perjudica poner una flecha y la letra N (que también podrá comprarse en la ferretería) en el cuadro, que indiquen el norte magnético. No nos olvidemos, pues, de una brújula.

Cuesta percibir en la foto rastros sutiles del terreno, tales como pisadas o picotazos. Resolveremos la dificultad con fichas de póquer de colores. Supongamos que en la arena hay siete picotazos independientes, aunque muy juntos. Señalizaremos entonces el lugar con una ficha de póquer rotulada con el número 7 trazado con rotulador grueso de color negro sobre una etiqueta adhesiva. Así, una fotografía del emplazamiento documenta la posición de la ficha sobre la cuadrícula y el número de agujeros de comida en ese lugar, aunque los mismos pudieran no ser visibles. Para consignar



Rápidos cambios de conducta, captados en videocintas, revelan que los zarapitos tienden a actuar en concierto

diferentes señales (picotazos, pisadas, excrementos) nos podemos ayudar de fichas de distintos colores. También podría el lector teñir algunos metros de cuerda de tender la ropa y emplear ésta rodeando los lugares de interés.

Si una zona necesita una explicación ulterior, una ficha de póquer con una señal especial (un asterisco, por ejemplo) remitirá a un apartado específico de nuestro cuaderno de campo. Seamos coherentes con el uso de los colores con fichas y cuerdas. Una vez establecido un convenio de colores, anótese claramente en el cuaderno de campo.

En la ilustración de la página precedente se representa el comedero de una grupo de 22 zarapitos. Los diagramas de este tipo revelan a los naturalistas aspectos fascinantes de esas aves. De acuerdo con mis propias observaciones, el número de excrementos por unidad de área es mucho mayor fuera de la zona de comedero que en el interior de su perímetro. Tal disposición sugiere que los zarapitos han evolucionado de modo que no defecan donde comen, estrategia de ventajas evidentes. Sabiendo cuántos pájaros comen en ese emplazamiento y durante cuánto tiempo, puede estimarse el número medio de excrementos producidos por un individuo que se alimente allí por unidad de tiempo, dato que constituye un indicador biológico básico de la salud de la población.

Las señalizaciones levantadas en los comederos como éste se captan fácilmente con pocas fotos. Para registrar las acciones de los animales en el momento en que ocurren nada supera a una cámara de vídeo. Necesitaremos una caja protectora, al menos dos juegos de baterías de larga duración y un trípode. Un zoom para acercarse al objeto también es de ayuda. Vénzase la tentación de sacar sólo primeros planos. Tomando planos gran angulares podrá observar después patrones de conducta de un grupo que se le pasaron antes sobre el terreno.

Tras examinar algunas huellas de pisadas de una pequeña bandada de zarapitos que comían en la playa, descubrí un notable instinto de manada. Uno de ellos empezó a comer y en sólo 40 segundos se le unió la bandada. Minutos después otro pájaro empezó a bañarse en el rompiente y en menos de un minuto todos los demás habían dejado la comida y estaban bañándose. Luego llegó el atildado en grupo, el rascado de orejas y la sacudida de cabezas. En el curso de una hora, la bandada pasó por seis actividades diferentes.

Con la videocinta era cosa de niños observar lo que ocurría. La celeridad con que el grupo pasaba de una conducta a otra resultaba sorprendente. ¿Por qué evolucionaron esos pájaros para comportarse así? No lo sabe nadie, pero quizá con un estudio coordinado los aficionados a la observación ornitológica podrían ayudar a resolver la cuestión.

Para más información acerca de este u otro proyecto para científicos aficionados, únase al foro en la página World Wide Web de la Society for Amateur Scientists: enlace con www.thesphere.com/SAS/ y haga clic en "Forum". También puede escribirse a la sociedad en 4735 Clairemont Square, Suite 179, San Diego, Ca 92117, llamar al 619-239.88.07 o dejar un mensaje en el 800-873.87.67.

Ian Stewart

Enlatado de sardinas redondas

"Sardinas en lata" es un juego de sociedad que consiste en lograr acomodar en un armario el número máximo de personas posible. También a los matemáticos les gusta el juego de enlatar sardinas, pero como pescados y personas tienen formas poco manejables, prefieren los círculos. ¿Qué tamaño, como mínimo, ha de tener un envase cuadrado, para poder empaquetar en él 49 botellas de leche? O, lo que es equivalente, dado un cuadrado de lado unidad, ¿qué diámetro tiene el círculo mayor, dentro del cual podemos empaquetar 49 copias en cuadrado, sin que los círculos se traslapen?

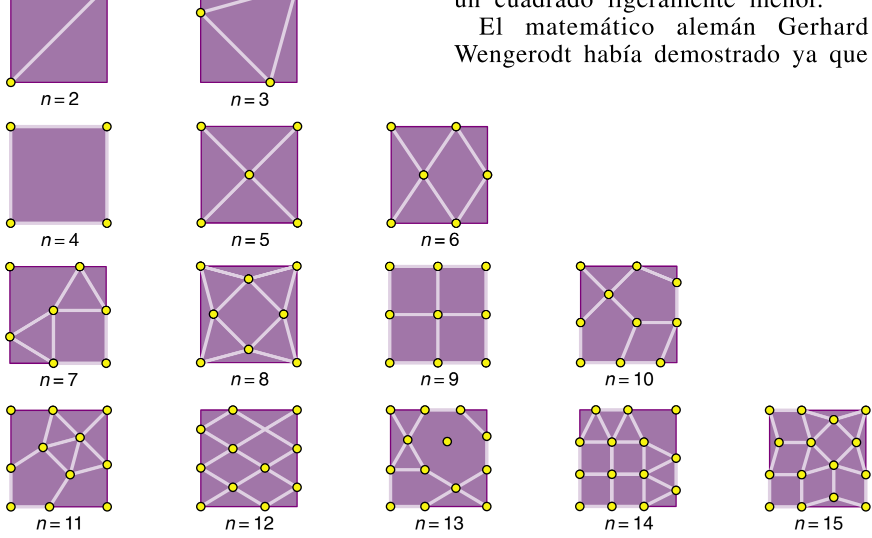
Para ver que estas dos cuestiones son equivalentes, notemos que en cuanto un problema esté resuelto automáticamente lo estará el otro, por un simple cambio de escala. Siempre y cuando, desde luego, que no pongamos las botellas cabeza abajo, ni de costado.

Casi toda las información que tenemos acerca de esas cuestiones se remonta como mucho a 1960. Lo que no debe extrañarnos dada la sutileza de la "geometría combinatoria", nombre con que es conocida esta especialidad. Sin duda, por ejemplo, parece obvio que la mínima caja cuadrada en la que es posible empaquetar 49 botellas de diámetro unidad ha de tener siete unidades de lado: basta colocar las botellas en formación cuadrada. Es evidente, sí, pero falso. En 1997, Kari J. Nurmela y Patrick R. J. Östergård, de la Universidad de Tecnología de Helsinki, hallaron la forma de empaquetar 49 botellas en un cuadrado ligeramente menor.

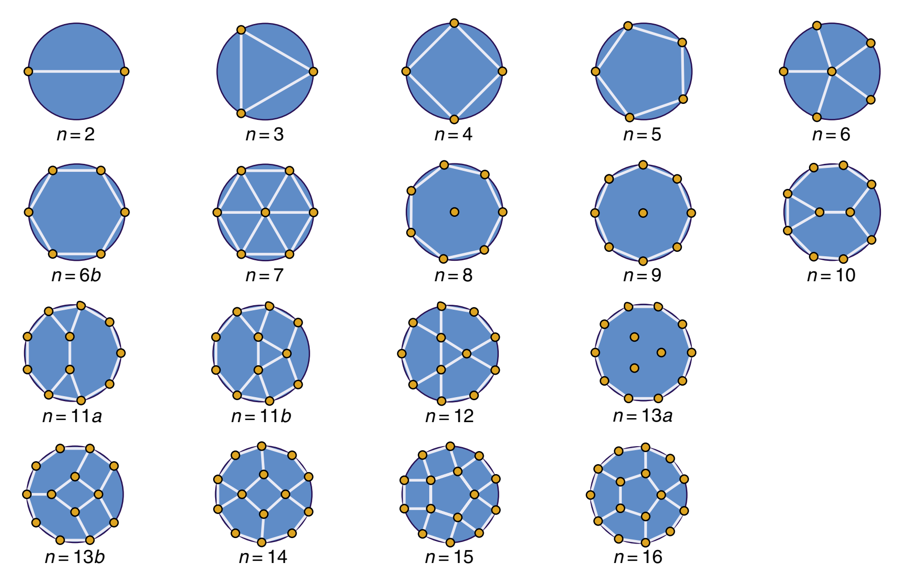
El matemático alemán Gerhard Wengerodt había demostrado ya que el empaquetamiento cuadrado "evidente" es óptimo en el caso de 1, 4, 9, 16, 25 y 36 círculos, pero que no lo es, en cambio, para 64, 81 o cualquier otro cuadrado perfecto mayor.

El empaquetamiento tiene que dejar de ser óptimo para algún número suficientemente grande de círculos. En el plano infinito, el empaquetamiento más denso no es la retícula cuadrada, sino la hexagonal, como la disposición de las bolas al principio de una partida de billar americano. La condición de que el contorno sea cuadrado impide la formación de una retícula hexagonal perfecta, razón por la cual, cuando el número de círculos es pequeño, las disposiciones óptimas son cuadradas. Sin embargo, cuando el número aumenta lo suficiente, el efecto del contorno se vuelve tan pequeño que existen soluciones, próximas al retículo hexagonal, que permiten alojar más círculos en el cuadrado unidad que la disposición en cuadro.

He recibido hace poco una tesis doctoral, defendida en la Universidad de Utrecht en diciembre de 1997, titulada *Packing and Covering with Circles*, de Hans Melissen. Es, con mucho, la mejor y más completa exposición sobre este tipo de cuestiones de la que yo tengo noticia. El problema de empaquetar círculos iguales dentro de un cuadrado, tratando de hacer máximo su tamaño, parece haber sido analizado por vez primera en forma impresa en 1960. Leo Moser conjeturó una solución para ocho círculos. Tal solución, verificada poco después, condujo a una serie de publicaciones sobre la misma cuestión con diferentes números de círculos. En 1965, Jonathan Schaer, por entonces en la Universidad de Alberta y uno de los matemáticos que demostró la conjetura de Moser, publicó soluciones para un máximo de nueve círculos. Schaer observó que los empaquetamientos óptimos para cinco o menos círculos son fáciles, y atribuyó la solución para $n = 6$ a Ronald Graham, que en la actualidad



Círculos idénticos en un cuadrado, representados por puntos que definen los centros; la distancia mínima entre dos puntos cualesquiera es la suma de los dos radios, o sea, el diámetro de un círculo. Para facilidad de cálculo, los lados del cuadrado se han desplazado hacia adentro según la longitud de un radio del círculo. En tal caso, el problema de empaquetar círculos se reduce al de hallar la distribución óptima de puntos en el seno de la región menor. Las figuras indican la forma de empaquetar círculos del máximo tamaño posible en un cuadrado de lado unidad. En algunas de las disposiciones, como la correspondiente a 13 círculos, existen "puntos libres", cuyas posiciones tienen "holgura", pues no están completamente determinadas



Círculos empaquetados en un círculo, representados por puntos en el seno de un contorno menor, como se ha descrito para el cuadrado. En el caso de seis puntos existen dos soluciones. Una de ellas entraña cinco puntos en el contorno, con cierta holgura de movimientos, más otro punto en el centro. La otra solución es un hexágono. Existe más de una solución al problema en otros varios casos

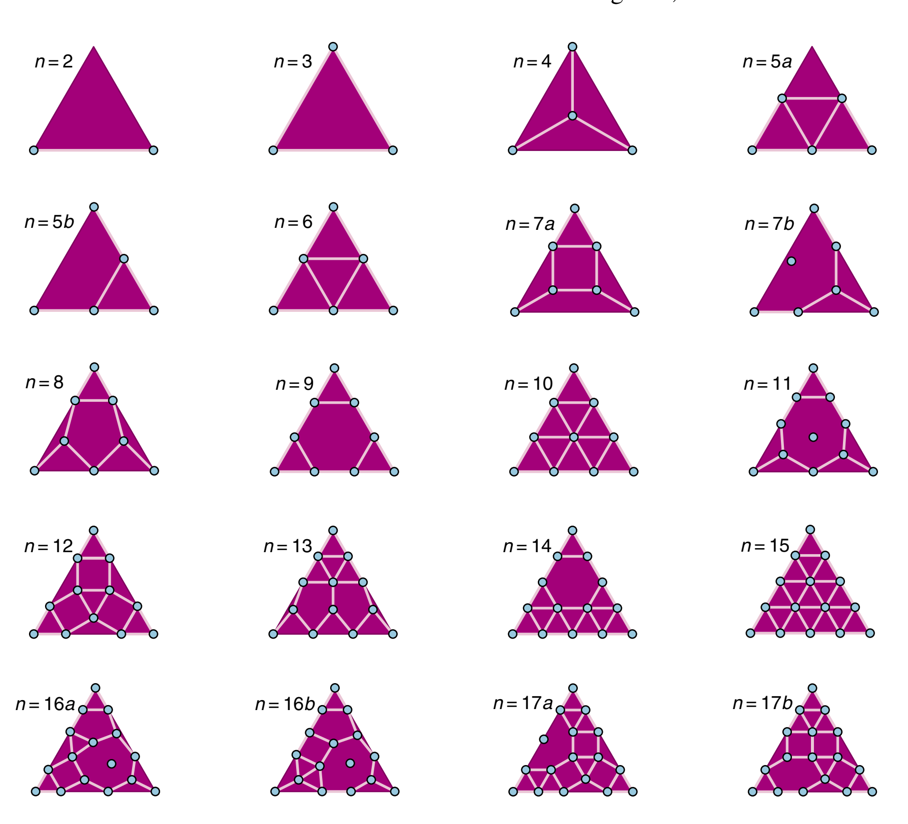
se halla en Lucent Technologies, de los Laboratorios Bell.

Los matemáticos acostumbran a plantear el problema con otra formulación, para no tener que prestar atención a los círculos. Cuando dos círculos iguales son tangentes, sus centros están separados por una distancia igual a su diámetro común. Y si un círculo toca a una frontera recta, su centro se encuentra sobre una recta paralela a esa frontera, a una distancia igual al radio. Si representamos los círculos por sus centros, el problema puede quedar planteado así: “Sitúense 49 puntos (los centros) en el interior de un cuadrado dado, para maximizar la separación mínima entre dos cualesquiera de ellos.” El diámetro de los círculos es, entonces, la mínima de las distancias entre los pares de puntos. Pero el cuadrado ya no es el primitivo; ahora es menor, con lados desplazados hacia adentro en magnitud igual al radio.

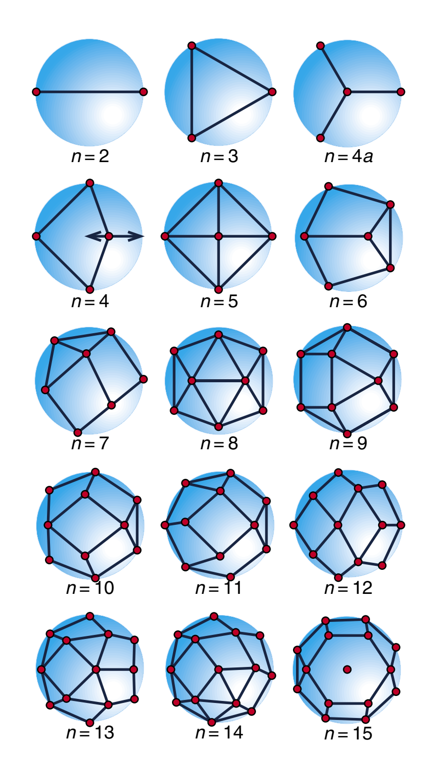
La formulación “puntual” ofrece la ventaja de ser conceptualmente muy sencilla. En la ilustración de la página precedente se muestran, resumidas, las disposiciones óptimas para un máximo de hasta 15 puntos. Una variante más delicada se ocupa de los empaquetamientos de círculos (o, lo que es equivalente, de puntos) en el interior de un círculo. La primera de las publicaciones conocidas sobre esta cuestión es la tesis doctoral de Boele L. J. Braaksma, de la Universidad de Groningen, fechada en 1963, sobre una cuestión técnica de análisis matemático. Perdida entre los tecnicismos, está su conjetura sobre la disposición óptima de ocho puntos, que posteriormente logró demostrar, aunque no llegó a publicarla. En la actualidad se conocen soluciones para 11 puntos, como máximo. Se han propuesto disposiciones óptimas para un número de puntos comprendido entre 12 y 20, pero no se dispone de demostración.

Fue Melissen el primero en proporcionar una demostración para el caso de 11 puntos. Empieza descomponiendo el círculo en un sistema de regiones de curiosas formas, y después, por estimación de las distancias, demuestra que algunas de esas regiones contienen, como máximo, uno de los puntos que hay que distribuir por el interior del círculo. De esta forma, el investigador va gradualmente adquiriendo “control” sobre la disposición de los puntos, estableciendo en este caso que ocho de los puntos han de estar situados sobre el contorno del círculo. Es un método delicado, que se funda en una elección inteligente de la partición. Es, sin embargo, lo bastante general como para que alguna de sus variantes sea utilizable en muchos problemas de este jaez, auxiliadas, muchas veces, por cálculos en ordenador.

Revisten particular interés los empaquetamientos en el interior de un triángulo, porque este contorno se relaciona muy claramente con el retículo hexagonal, como bien sabe



Un contorno triangular favorece la aparición de pautas hexagonales de puntos



El hemisferio insta un conjunto de patrones distinto del círculo en razón de la curvatura de la superficie

todo jugador de billar americano. El marco de madera o de plástico utilizado para colocar las bolas es un triángulo equilátero. Las bolas de su interior se empaquetan unas junto a otras, formando parte de un retículo hexagonal. A decir verdad, al principio, tales empaquetamientos sólo se estudiaron cuando el número de círculos era un número triangular, es decir, de la forma $1 + 2 + 3 + ... + n$. Los correspondientes números de círculos —1, 3, 6, 10, 15, etc.— pueden quedar distribuidos en una parte de un empaquetamiento reticular perfecto.

Hoy se sabe que el retículo hexagonal constituye la disposición óptima en todo el plano, hecho que se daba por supuesto, pero que Axel Thue fue el primero en demostrar, en 1892. Parece, pues, sumamente plausible que el empaquetamiento óptimo de un conjunto triangular de puntos en el interior de un triángulo equilátero sea la disposición clásica de las bolas de billar. Y así ocurre, en efecto, pero la demostración resulta delicada; la de Melissen se distingue por su especial claridad. También encuentra (y demuestra) distribuciones óptimas para 12 o menor número de puntos, juntamente con conjeturas para 16, 17, 18 , 19 y 20 puntos.

El problema del empaquetado puede plantearse incluso sobre superficies curvas. En 1930, el botánico holandés Pieter M. L. Tammes pedía empaquetamientos óptimos de círculos sobre la superficie de una esfera [*véase* “El número de osculación” en la sección de Juegos matemáticos, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1992, pág. 94]. Melissen considera una variante del problema de Tammes, y utiliza, no una esfera, sino un hemisferio. Aunque demuestra los resultados en los casos de seis puntos o menos, se limita a formular conjeturas para los casos de 7 a 15 puntos. (Para quienes se sientan ambiciosos, ¿qué les parecería empaquetar esferas en regiones tridimensionales?)

En 1985, Alexander A. Berezin, de la Universidad McMaster, en Ontario, publicó una nota breve en *Nature* relativa a las configuraciones de energía mínima de partículas cargadas eléctricamente en el interior de un disco. Este problema tiene el sabor matemático del empaquetamiento de círculos, porque las partículas se repelen mutuamente. Lo que importa, sin embargo, no es tanto la separación como el balance energético: el sistema ha de hacer mínima su energía total. En cualquier caso, la intuición parecía imponer que las cargas habrían de empujarse unas a otras hasta el borde del disco. Pero los cálculos numéricos de Berezin demostraron que, para un número de cargas electrostáticas comprendido entre 12 y 400, la distribución con una carga en reposo en el centro, y el resto en el contorno, tiene una energía potencial menor que si todas estuvieran en el contorno.

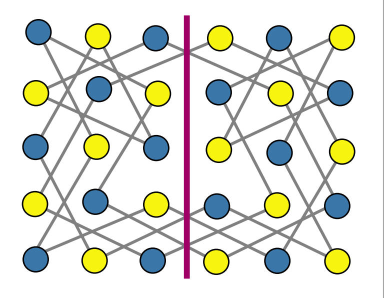
La discrepancia entre la intuición física y los cómputos de Berezin acabaron por resolverse en favor de la física. El universo físico real no contiene una infinidad de discos infinitamente finos. En verdad, el punto central tiende a migrar una diminuta distancia del verdadero centro, y es entonces impulsado hacia el contorno.

No obstante, el problema sigue todavía teniendo mucho interés. Melissen, por ejemplo, da la primera demostración de que los resultados numéricos de Berezin son correctos. Así que, a pesar de las dificultades técnicas, se están consiguiendo muchos progresos en estas cuestiones tan elegantes cuan desconcertantes. Y espero seguir teniendo noticia de otras nuevas.

Acuse de recibo

No pediré disculpas por tocar de nuevo el tema de los recorridos de caballo (junio de 1997 y Acuse de recibo de noviembre de 1997). Richard Ulmer, de Denver, me ha enviado una carta de gran riqueza informativa sobre la cuestión, en torno a la cual está preparando una tesis. Ulmer señaló que mi recorrido de 6×6 es uno de los 10 recorridos (de un total de 9862) que posee simetría de rotación de 90º. Yo había señalado que el mínimo valor de n para el que existe un recorrido en el tablero de $3 \times n$ es 10. Según su cálculo, existen exactamente 16 recorridos en este tablero, 176 en el de 3×11, 1536 en el de 3×12, y así sucesivamente hasta la asombrosa cifra de 107.141.489.725.900.544 recorridos distintos en el tablero de 3×42. Existen ocho soluciones en tablero de 5×6; 44.202 en el de 5×8, y 13.311.268 en el de 5×10.

Ulmer señala, asimismo, que ningún recorrido de caballo puede tener simetría axial respecto a la diagonal. En un rectángulo cuyos dos lados sean números pares, ningún recorrido es simétrico respecto a uno de los ejes principales. Cuando el lado vertical es impar, sigue siendo imposible un recorrido con simetría axial horizontal. Sí existen recorridos de caballo con simetría axial en ciertos tableros (*derecha*). Específicamente, pueden darse cuando uno de los lados es impar y el otro, el doble de un número impar. La conjetura actual de Ulmer es que, tal vez con alguna excepción de poca monta, sí existen recorridos con simetría axial en todos los tableros de ese tipo. —*I.S.*



Recorrido de caballo con simetría axial

James Burke

De colores

Hace poco hemos hecho algunos cambios en la decoración de la casa. El rechazo que me produjo un desagradable tono de verde aguacate me trajo a la memoria a la emperatriz francesa Eugenia, cuando cierta noche de 1863 se presentó en la Opera de París y arrasó con un vestido de seda verde.

No era un verde cualquiera, era verde aldehído, el último grito de la técnica de vanguardia obtenido de un filón químico, el alquitrán de hulla. La razón por la que el vestido de la emperatriz produjo tamaña sensación radicaba en que el verde no parecía azul bajo las luces de gas. Ese mismo año el químico alemán Lucius había descubierto el tinte. Además de asombrar al público de la Opera, el nuevo colorante también contribuyó al éxito de la compañía de su descubridor, denominada más tarde Hoechst.

Ignoro qué obra se representó aquella noche. No pudo ser *Carmen*, estrenada en 1875, viviendo ya la dama en el exilio. La condesa de Montijo, su madre, proporcionó el argumento de la obra a Prosper Mérimée en 1830 cuando éste se encontraba en casa de los Montijo. Todos se rindieron al encanto de Mérimée, incluida la pequeña Eugenia que tenía entonces cinco años y la llamaban todavía por su nombre español. Allí sacó Mérimée la historia para su novela *Carmen*, en la que Bizet basaría más tarde su ópera.

Mérimée y Eugenia mantuvieron una relación estrecha, lo que tal vez favoreciera que ella recomendara a su buen amigo Prosper años más tarde cuando ya se había casado con el emperador Napoleón III. De inmediato se le otorgó el título de senador y recibió un generoso apoyo económico que le permitió dedicarse a escribir teatro y novelas. Mientras tanto, el emperador no sabía que Mérimée había tenido una aventura (una de tantas) con la amante de su tío. Los deslices sexuales, que empezaron cuando Mérimée aún no había abandonado el colegio, le acompañaron durante la mayor parte de su vida.

En aquellos días de escuela, uno de sus mejores amigos fue Adrian de Jussieu, personaje mucho menos atractivo. Ultimo vástago de una estirpe de botánicos, sucedió a su padre cuando éste se jubiló del Jardin des Plants. Se limitó a seguir sus pasos y poca cosa más. Su hija, sin embargo, se casó con alguien que sí hizo algo destacable. Armand de Fizeau calculó en 1849 la velocidad de la luz con la ayuda de un ingenioso dispositivo de rueda dentada, de 720 dientes, que giraba a gran velocidad. Dirigió un haz de luz hacia los dientes y hacia un espejo que había situado detrás de la rueda dentada a varios kilómetros de distancia. El espejo reflejaba la luz cuando los dientes no se interponían. A partir de la velocidad con que giraba la rueda y el punto en que los dientes impedían el paso de la luz estimó que la luz se movía a 315.000 kilómetros por segundo, un cálculo muy próximo a lo que nosotros sabemos que son 299.792,458.

Contó con la estrecha colaboración otro ex-alumno de medicina, como él mismo, que no podía soportar la visión de la sangre, Léon Foucault. En 1845 ambos obtuvieron los primeros daguerrotipos nítidos de la superficie del Sol. Mientras investigaban un mecanismo que les permitiera orientar la cámara al Sol (y luego a las estrellas) durante largos períodos de exposición, Foucault inventó su magnífico péndulo. Ese mismo año y al par que trabajaba en el laboratorio parisiense de Henry Regnault conoció a un joven inglés, muy reservado, William Thomson, a quien más tarde se conocería como Lord Kelvin, famoso por el cero absoluto (no por serlo en absoluto). También estaba destinado a hacer grandes cosas. Tal vez la menos importante fuera el desarrollo de una teoría que explicaba cómo algunos cristales respondían a los cambios de temperatura mediante la adquisición de propiedades magnéticas. Demostró que había una relación entre la temperatura y la polaridad permanente de estos cristales.



En 1824 Sir David Brewster ya había bautizado este fenómeno como "piroelectricidad". Este bravo escocés, que tan poco éxito había cosechado como tutor, editor, predicador y poeta del amor, terminó por dedicarse a la ciencia. Estudió varios tipos de polarización e inventó el caleidoscopio, instrumento inicialmente destinado al diseño de patrones para alfombras, telas y papel de pared. Y, ¿por qué no? "Empeñado en el avance de áreas de la ciencia que habían permanecidos descuidadas durante mucho tiempo", tal como lo describe la bibliografía (¡como un moderno doctorando!), Brewster cosechó pronto importantes distinciones y alcanzó la máxima categoría en la Universidad de Edimburgo.

Brewster se casó con Juliet, la hija menor de James MacPherson, quien alteró el curso de la historia de la cultura. Tras un viaje por los Highlands escoceses, sostuvo haber descubierto un gran poema épico gaélico escrito en el siglo III por un celta llamado Ossian. Esta brizna de autoexpresión arquetípica de la Europa antigua sacudió como un terremoto el mundo filosófico (y en especial el alemán). El retrato épico de una existencia anterior más sencilla casi se bastó para dar pie al movimiento romántico. Años más tarde, esta descripción de una vieja sociedad guerrera de superhombres haría concebir un par de ideas a los nazis. Hasta Thomas Jefferson era del parecer de que Ossian constituía "el mayor vate que había pisado la Tierra".

Sorprendente fama la de algo que décadas más tarde se reveló un fraude. Tres años después de la publicación del poema en 1763 y de que MacPherson alcanzara el rango de monstruo en literatura partió a América para desempeñar las tareas de secretario del gobernador de Florida, puesto que obtuvo gracias al buen hacer del conde de Bute.

A Bute se le recuerda como un político desagradable que fue primer ministro durante un año. Se olvida su decisiva influencia sobre el Príncipe de Gales en la construcción en Kew, en los aledaños de Londres, del que habría de ser uno de los principales jardines botánicos del mundo. Bute se había revelado durante años como experto jardinero y en 1757 convenció a la princesa Augusta de que nombrase arquitecto de los jardines a Sir William Chambers.

Cuatro años más tarde Chambers construyó la maravillosa pagoda de Kew, cincuenta metros de filigrana china en la vieja Europa. De acuerdo con el nada contenido estilo de la época, también erigió una mezquita, una "Alhambra", varios templos clásicos y una catedral gótica de imitación. Chambers se convirtió en maestro en el género de los templos de jardín y miembro de la comisión encargada de la construcción de Somerset House, un gris e imponente edificio que en la actualidad alberga la Hacienda británica. Se lo merece.

Chambers trabajó en la comisión con Robert Adam, uno de los más influyentes diseñadores de la historia de la arquitectura. Al regreso de una estancia en Europa en la que había descubierto las maravillas griegas y romanas, convirtió la fachada en una forma de arte. Adam se propuso convencer a la aristocracia inglesa de que sus ruinosas mansiones ganarían con entradas dóricas flanqueadas por columnas. Cuando terminó su trabajo, todo aquel que era alguien vivía en algo parecido a un banco.

El descontrolado éxito de Adam propició la aparición de muchos imitadores. Uno de ellos, George Dance, "adamizó" un edificio conocido como Camden Place, en Chislehurst, un pueblo de Kent. A finales del siglo XIX su propietario, un aristócrata menor, se lo alquiló a una emperatriz exiliada que vestía trajes de seda verdes.

Caos

Matemático

CHAOS THEORY TAMED, por Garnett P. Williams. Taylor & Francis Ltd.; Londres, 1997.

Como el nombre indica, el autor hace una presentación de la teoría del caos "domesticada''. En principio su idea es que sea asequible a científicos de áreas diversas y a un amplio sector de público con un mínimo bagaje matemático, ya que se introducen la mayor parte de los conceptos en el propio texto.

Después de un inicio, en el que el autor expone una panorámica de los fenómenos caóticos, sus causas, el interés que tiene el analizarlos y algunos comentarios históricos, se introduce una parte de las herramientas matemáticas para estudiar el caos, como son la ideas de espacio de fases y diversos útiles para analizar series temporales. Se aprecia un notable optimismo en el autor: si el lector requiere que se le expliquen las ecuaciones de rectas en el espacio, difícilmente podrá digerir con facilidad los conceptos que se introducen a continuación.

Conviene aclarar en este punto que el concepto de "caos matemático" no hace referencia a una ausencia de estructura o de orden. Se supone que los sistemas estudiados son en realidad (o mayoritariamente) deterministas, pero no es posible efectuar predicciones fiables debido a la gran sensibilidad de la evolución respecto a las condiciones iniciales. Se encuentran a faltar en el texto criterios que permitan reconocer si es admisible suponer que un fenómeno presenta un comportamiento determinista o no.

A continuación se ofrecen algunos de los "caminos'' que llevan a dinámicas caóticas, y se revisan las principales características del caos: dependencia sensible de las condiciones iniciales, atractores extraños, auto-organización y complejidad del caos, así como el inherente carácter fractal de las estructuras originadas.

Finalmente se muestran algunas técnicas que permiten reconocer comportamientos caóticos: aplicaciones de Poincaré, aplicaciones de un extremo al siguiente, reconstrucción de órbitas a partir de series temporales en una variable, mediante el artificio de "dibujar" una variable con diferentes retrasos, etc. Se discuten distintos conceptos de dimensión y diversas medidas cuantitativas del caos, como son los exponentes de Lyapunov, la entropía, la información mutua y la redundancia.

El enfoque del libro es básicamente fenomenológico. No conviene olvidar que el autor es un geólogo y las "técnicas de análisis del caos'' que presenta, son las que utiliza en su quehacer. Además de muchas ideas intuitivas sobre la dinámica caótica, el texto contiene una excelente información sobre análisis de datos experimentales (quiero decir obtenidos de experimentos físicos y no de simulaciones con ordenador).

Se echa en falta una más amplia discusión de la estructura geométrica del espacio de fases. Se introduce en el lugar conveniente, pero no se saca de él toda la comprensión que puede aportar. En particular no es suficiente que un sistema sea no lineal para que aparezca caos. Es ciertamente necesario, como lo es que exista un cierto comportamiento hiperbólico (esto es, en alguna zona del espacio de fases debe haber objetos que se comporten como una silla, con una dirección por la que nos acercamos y otra por la que escapamos). Finalmente debe haber una cierta realimentación. En caso contrario los puntos escapan sin volver a pasar por la misma zona. Ello lleva, de manera natural, a hablar de las variedades invariantes de los objetos hiperbólicos y de sus intersecciones y, en particular, de las órbitas homocíclicas transversales, que son los objetos matemáticos que permiten describir claramente el caos. Otra cosa es que sean fáciles de encontrar en sistemas medianamente complicados, pero la idea clave es una idea geométrica.

CARLES SIMÓ

Ciencia clásica

Hombre y mundo

THE RHIND MATHEMATICAL PAPYRUS, por Gay Robins y Charles Schute. British Museum Press; Londres, 1998. **ANCIENT EGYPTIAN MEDICINE**, por John F. Nunn. British Museum Press; Londres, 1997.

HIPPOCRATE. AIRS, EAUX, LIEUX. Edición preparada por Jacques Jouanna. Les Belles Lettres; París, 1996. **ARISTOTLE ON THE SENSE-ORGANS**, por T. K. Johansen; Cambridge University Press; Cambridge, 1998. **ARATUS. PHAENOMENA**. Edición preparada por Douglas Kid. Cambridge University Press; Cambridge, 1997.

GALEN. ON THE ELEMENTS ACCORDING TO HIPPOCRATES. Edición preparada por Phillip de Lacy. Akademie Verlag; Berlín, 1996. **GALEN ON PHARMACOLOGY**. Dirigido por Armelle Debru. Brill; Leiden, 1997. **DIETING FOR AN EMPEROR**. *A Translation Book 1 and 4 of Oribasius´ Medical Compilations.* Edición preparada por Mark Grant. Brill; Leiden, 1997.

Movimientos románticos y tendencias racionalistas que han venido animando la vida intelectual desde el ecuador del siglo pasado coinciden en proclamar una vuelta a las fuentes. Lejos de desempolvar viejos saberes, lo que se busca es recuperar el talante crítico y reflexivo sobre nuestra comprensión del mundo y del puesto que en su seno ocupa el hombre. Las fuentes de la ciencia occidental son, por antonomasia, los textos griegos de la época clásica, cuyo contenido se insinúa ya en los papiros egipcios, merece la glosa helenística y se resume en las enciclopedias de Oribasio, Alejandro de Tralles y Pablo de Egina.

En romería académica viajaron a Egipto filósofos e historiadores presocráticos. Allí recalaron matemáticos de Samos para aprender el secreto

de los números y las proporciones. Acudieron médicos de Jonia en busca de remedios para las enfermedades. Ahora podemos también reandar ese *iter* en magnífica compañía: *The Rhind Mathematical Papyrus* y *Ancient Egyptian Medicine*. Nos ayudan a remontar las dificultades. Primera, el idioma. Se ignora el lenguaje hablado y el significado de muchas palabras. Segunda dificultad, la escasez documental. Tercera, la duración; la civilización egipcia desde el Reino Antiguo hasta Hipócrates cubre un intervalo temporal tan dilatado como el que transcurre entre el de Cos y nosotros.

El comienzo del registro histórico, la primera dinastía, coincide con la unificación del Alto y Bajo Egipto en torno al 3100 a.C. En la segunda dinastía se estableció comercio con el Líbano, lo que supuso un frecuente intercambio de madera y drogas. Durante el reinado de Netjerkhet (Djoser) en la tercera dinastía se levantó la pirámide de Saqqara. El Reino Antiguo abarcó de la tercera a la sexta dinastía (c.2686-2181 a.C.). Son siglos de esplendor con la construcción de las grandes pirámides de Giza, prueba irrefutable de un nivel asombroso de preparación en matemática, astronomía, cantería, transporte y organización. Los jeroglifos adquirieron entonces su forma canónica.

El país se hundió en la inestabilidad durante el Primer Período Intermedio. A este siguió una época de reafirmación de la autoridad central y otra de gran esplendor, el Reino Medio (c.2040-1795), edad de oro de la lengua y la medicina egipcias. El Segundo Período Intermedio corresponde al de dominación extranjera por los hyksos. Se redactó entonces el papiro Rhind. Este manual de matemática, el más antiguo del mundo, formaba, en su estado originario, un rollo de 14 hojas, de unos 40 cm de ancho por 32 cm de alto cada una. Firma el papiro el copista Amos, quien dice que está escribiendo en el cuarto mes de la estación de inundaciones del año 33 del reinado de Auserre (Apofis); recuerda también que copia una obra escrita ya antes en el reinado de Ny-maat-re. Ese fue el nombre dinástico de Amenemes III, quien reinó en la segunda mitad del siglo XIX a.C.

Los jóvenes alcanzaban el adiestramiento matemático tras una dura etapa discente. Se les enseñaba las cuatro reglas sin emplear signos indicativos de las operaciones. Los egipcios utilizaban una notación decimal. Para multiplicar procedían por sucesivas duplicaciones y adiciones. La escritura *jeroglífica* tenía signos distintos para las unidades, decenas, centenas, etc., cuya cifra se indicaba mediante repetición del signo. Al carecer de signo para el cero y de notación posicional, la representación de números altos resultaba muy compleja. Orillaban el problema mediante recursos de abreviación de la escritura *hierática*, que se empleaba en documentos y era una derivada semicursiva de los jeroglifos.



Hoja del papiro matemático de Rhind

El codo real, unidad básica de longitud, se subdividía en palmos, fraccionados a su vez en dedos. Divisores y múltiplos había también del *setat*, unidad de superficie, que vendría a equivaler a unas 0,275 hectáreas. La unidad básica de volumen era el *hekat*, unos 4,8 litros, con que se medía el grano o harina. Para determinar la capacidad de sus graneros, habían deducido de una forma ingeniosa que el volumen del cilindro era el área de su base multiplicada por la altura. Su método de obtener el área de un círculo fue el mejor del mundo prehelenístico: tómese el diámetro del círculo, sustráigase la novena parte y elévese al cuadrado el resultado.

Aunque los restos humanos y las estelas nos ofrecen claves para adivinar el quehacer médico de los egipcios, con mucho la fuente principal de información se encuentra en los papiros. Cuenta Clemente de Alejandría, del siglo II d.C., que el conocimiento humano poseído por los egipcios se encerraba en 42 libros. Los seis últimos, de contenido médico, reseñaban la estructura del cuerpo, las enfermedades de las mujeres, patologías diversas, instrumental quirúrgico, remedios botánicos, los ojos y sus aflicciones.

Disponen los estudiosos de una serie monumental de referencia, *Grundriss der Medezin der alten Aegypter*, para sus análisis de los papiros fundamentales de Edwin Smith, Ebers, Kahun, Hearst, Chester, Berlín, Londres, Carlsberg, Ramesseum y Brooklyn. Cada manuscrito tiene su propia peculiaridad. El de Edwin Smith describe 48 casos de acción quirúrgica. A través de sus páginas de instrucciones podemos adentrarnos en la praxis médica que termina en el

diagnóstico. De éste parte el papiro de Ebers, fechado en torno al 1534 a.C., contemporáneo más o menos del anterior, para abordar remedios contra enfermedades, cuyos síntomas, sin embargo, omite. El de Edwin Smith compagina la exposición de casos particulares con una progresión sistemática a través del cuerpo, de la cabeza a los pies, según un orden que perdurará milenios.

Hasta los tiempos de Herófilo, médico griego que trabajó en Alejandría durante los albores del período ptolemaico, no parece que los egipcios realizaran disecciones en humanos. Los embalsamadores mostraron, en cambio, una notable pericia técnica para extraer los órganos internos susceptibles de rápida putrefacción a través de una incisión mínima.

En el mundo simbólico de la tradición faraónica, la orilla oriental del Nilo estaba asociada con la vida y la occidental con la muerte. Trasladada la analogía, el lado derecho (occidental) del cuerpo se vinculaba a la vida y el izquierdo (oriental) a la muerte. No conocemos sus doctrinas fisiológicas, si las hubo. Tampoco tenemos pruebas de que asociaran el cerebro con la mente. En el corazón residía la fuente de las emociones. Aunque creían que las arterias contenían aire, nada indica que imaginaran un sistema circulatorio.

Por lo que concierne a la patología, las causas y naturaleza de las enfermedades variaban de lo pragmático a lo mágico. Distinguían entre episodios traumáticos y trastornos clínicos internos, pero el instrumental quirúrgico y la farmacopea reparadores reflejaban cierto primitivismo. Sufrirían las osteoartritis o arteriosclerosis que padecen los egipcios actuales; sin embargo, la incidencia de cáncer parece haber sido mucho menor. No les sería desconocida la malaria y fue muy frecuente el enanismo. (Los egipcios de la antigüedad clásica eran de talla discreta, en torno al metro sesenta. Y la esperanza de vida no superaba la cuarentena.)

La influencia que atribuían a las deidades en la etiología de las enfermedades, de manera señalada en el mal sagrado (epilepsia), se prolongó por el Mediterráneo central y occidental. Lo que no impide atisbar, en terapia, visos de racionalidad bajo un manto de magia. Pero con Hipócrates se da el tránsito a la explicación científica, recorrido por el maestro Jacques Jouanna en su edición crítica de los *Airs, eaux, lieux*. A propósito de los Escitas, rechaza el autor hipocrático que la impotencia de los Anariados fuera un castigo de la diosa Afrodita por haber violado su santuario en Ascalon de Siria. El autor de Cos atribuye esa incapacidad al proceder regular de la naturaleza, donde hay que inscribir cualquier enfermedad. Lo mismo que en la enfermedad sagrada, el médico hipocrático exonera al paciente de toda culpa. La impotencia de los Escitas deriva de su entrega permanente a la equitación, lo que alteraría las vías seminales, y al tratamiento erróneo seguido para sanarla. El médico hipocrático, resalta Jouanna, no se opone a la religión; sólo rechaza la confusión de planos.

El autor de *Sobre los aires, aguas y lugares* ha redactado su obra para el médico itinerante. Cuando éste llegue a una ciudad debe fijarse ante todo en el clima, pues el estado de los cuerpos se modifica en función de las estaciones y del orto y ocaso de los astros que señalan las estaciones. Atenderá también a los factores locales: la orientación de la ciudad hacia los vientos, las salidas y puestas de sol, la cualidad de las aguas que utilizan los habitantes, la naturaleza del suelo. Distingue cuatro categorías de ciudades que se corresponden con las cuatro orientaciones axiales en relación a los vientos y a la salida y puesta solar. Las ciudades pueden mirar hacia los vientos cálidos del sur (entre el orto invernal y el ocaso invernal del sol); otras están expuestas a los vientos fríos del norte (entre el ocaso estival y el orto estival del sol). Las hay orientadas hacia el este (entre el orto estival y el orto invernal); y, por último, al oeste (entre el ocaso estival y el ocaso invernal del sol). Para cada una de ellas, se muestra la influencia de los aires sobre la constitución de los habitantes y el estado sanitario de la población.

El médico itinerante precisa conocer la naturaleza de las aguas que los habitantes de la ciudad beben o utilizan en la cocina o en la higiene. Estructura la exposición en torno a cinco grandes categorías de aguas. Las mejores para la salud son las aguas de lluvia, en tanto que las peores son las estancadas y las que proceden de fundición de la nieve. Y lo razona: en la formación de la lluvia, es la parte más ligera y la más tenue del agua lo que constituye la lluvia tras su separación del resto, mientras que en la formación del hielo es la parte del agua más pesada y espesa la que permanece tras la separación y desaparición de la parte más ligera y tenue.

El hombre no responde de forma meramente pasiva al medio que le condiciona. Cierto es que los factores externos, en la medida en que persisten en un mismo lugar, determinan la constitución del hombre, y en la medida en que varían de un lugar a otro determinan diferencias en dicha constitución y, por consiguiente, en las enfermedades que le afligen. Pero el hombre presenta también variables innatas que el médico ha de tener en cuenta para determinar las reacciones diferentes ante factores idénticos. Hubiera sido interesante que Jouanna abordara en su comentario la continuidad en el mundo orgánico de XII,5; tendría entonces un sentido más profundo la implicación del hombre en la naturaleza y se entendería mejor la respuesta dispar al medio.

Sobre los aires, aguas y lugares compara los pueblos de Europa con los de Asia. Puesto que el clima de Asia no sabe de excesos, sino que es equilibrado, sus habitantes, sin grandes diferencias mutuas, son más hermosos y robustos que los europeos. Estos, por contra, presentan una amplia gama de alturas y formas, debido a los cambios de calor y frío, de húmedo y seco. El médico itinerante no olvidará en su ejercicio las *nomoi*, término que remite de consuno a las costumbres y las leyes. Las nomoi son a los pueblos lo que el régimen (*díaita*) es a los individuos. Así como el régimen incide en la salud del individuo, los usos y leyes condicionan la moral de un pueblo.

Por la claridad de la exposición, por el espíritu de síntesis, por la amplitud de su enfoque que traspasa la medicina para desembocar en la etnografía y la antropología, el tratado *Sobre los aires, aguas y lugares* es uno de los más seductores del *Corpus hippocraticum*. Puede decirse con razón que nos hallamos ante el primer tratado de climatología médica de la literatura mundial, así como el primer tratado de antropología. Los problemas formales del texto los resuelve Jouanna razonando la unidad de la obra y de autor. En defensa de aquélla, no habría interpolaciones; en pro de ésta, no es objeción suficiente la diversidad aparente de asuntos entre la parte médica y la parte etnográfica. En ambas partes se intenta establecer las leyes de la causalidad necesarias entre los factores del entorno y el estado del hombre o de los pueblos.

Pero la explicación de la realidad depende de nuestro modo de

abordarla. Nada más radical en ese planteamiento que cuestionarse cómo llegamos a las cosas o éstas nos llegan a nosotros. De esas cuestiones trata *Aristotle on the sense-organs*. ¿Por qué tenemos órganos de los sentidos? En la respuesta a esa cuestión se basa la teoría aristotélica del conocimiento. Gracias a los órganos de los sentidos, percibimos. Para Aristóteles, *organon* es una herramienta. Un útil de percepción. A ésta, sin embargo, no la asocia con ningún proceso fisiológico, sino con el conocimiento que llama sensible y en el que el perceptor "hace suyo", se apropia, del objeto externo. Apropiación que modifica la situación del órgano perceptor.

Para entender el hilo argumentativo del estagirita hemos de abrir el tratado *Sobre el alma*. Dice allí Aristóteles que el alma es un principio (*arché*) de los animales. En cuanto principio merece ser lo primero conocido para explicar los demás fenómenos. En la doctrina aristotélica damos razón de algo cuando señalamos sus cuatro causas fundamentales, a saber, formal, material, eficiente y final. El alma es la causa y principio de los seres vivos en una triple acepción: en cuanto causa eficiente o principio de movimiento, en cuanto causa formal o del ser y en cuanto causa final; el cuerpo aporta la causa material. Los seres vivos constan, pues, de cuerpo y alma.

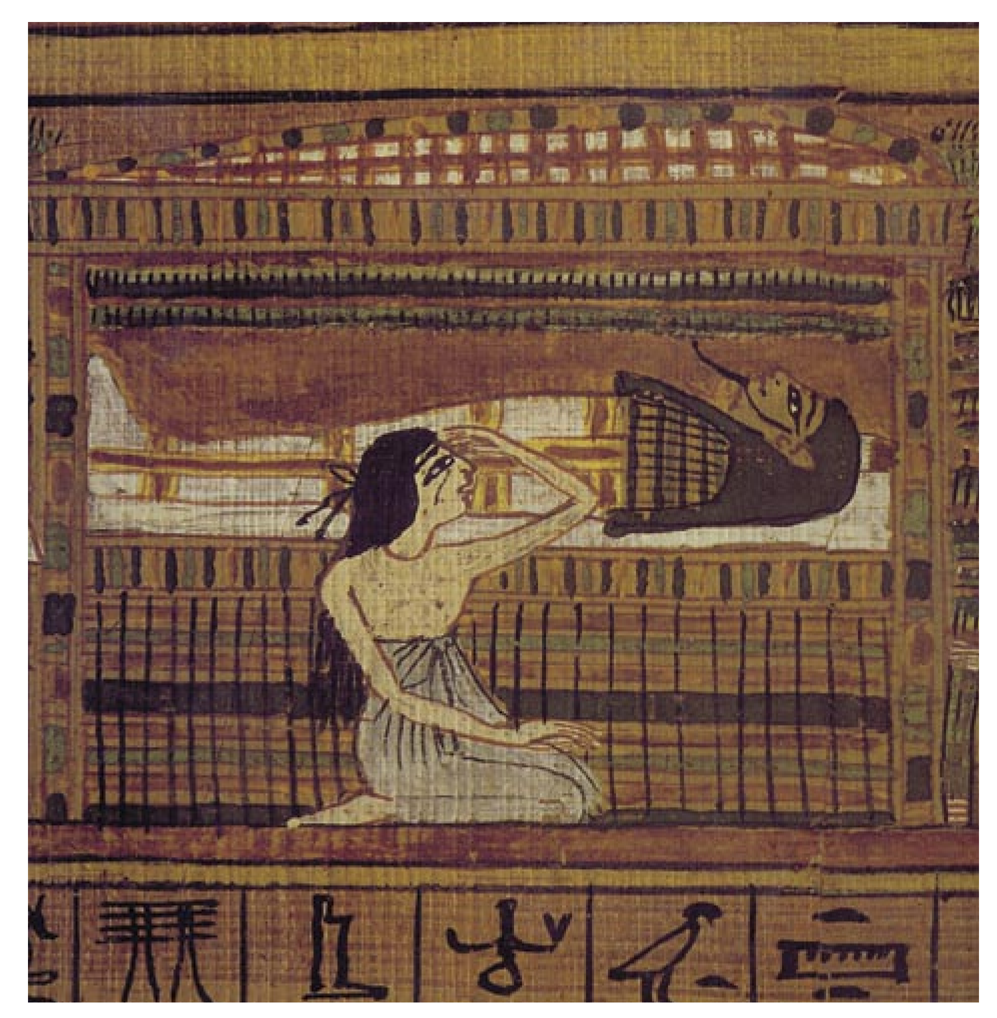
En el cuerpo hallan su sede los cinco sentidos. Estos son potencias o facultades (*dynameis*) que los animales poseen para percibir objetos. Potencia significa capacidad de apropiarse del contenido del estímulo externo: "Cuando veo una cajita roja mi facultad visual se hace roja en cierto aspecto." A cada órgano le asigna una función distintiva, acorde con su constitución característica.

La capacidad de ser cambiado o modificado por un objeto sensible sólo se encuentra en la materia. Ahora bien, la materia tiene que ser de un determinado tipo. Así, la capacidad para ser cambiada por los colores se encuentra sólo en materia transparente, como el agua, y la capacidad para ser cambiada por el sonido se encuentra sólo en materia que sea resonante, como el aire. Con el cambio o modificación la facultad o potencia se actualiza, se realiza. Entre el órgano de la visión y el estímulo óptico hay un tercer elemento, un medio donde el color pueda percibirse. Ese medio es la luz.

Con ser deseable acertar en el camino para llegar a conocer, lo importante, seguían los griegos, era el contenido del saber. Gracias a la ciencia, recoge Arato en su poema *Phaenomena*, años después de Aristóteles, entendemos mejor el mundo. Hijo de Atenodoro y Letófila, nació Arato en Soli de Cilicia, en torno al 310 antes de Cristo. Estudió con el gramático Menecrates de Efeso, el filósofo Timón y con Menedemo. En Atenas fue discípulo de Perseo y Zenón; allí se adhirió al estoicismo.

Los *Phaenomena* se inscriben en el género hesiódico, que toma por modelo de exposición *Los trabajos y los días*. Se trata, en efecto, de una épica didáctica desarrollada mediante la tríada clásica integrada por el proemio, narración del tema principal y conclusión. El núcleo consiste en enseñar a prosperar, a salir adelante, a quienes trabajan el campo o faenan en el mar. Ambos deben recibir instrucción práctica en astronomía que les capacite para interpretar los signos climáticos. El Zeus de la Stoa ha establecido en el cielo constelaciones y estrellas brillantes por las que guiarse entre los vaivenes de las estaciones.

Ortos y ocasos de las estrellas aparecían ya indicados en los calendarios, en los parapegmata esculpidos en piedra de muchas ciudades griegas. Las constelaciones descritas por Arato se disponen en dos áreas principales: la septentrional y la meridional, con un paso de transición entre ambas y una estrecha zona a ambos extremos. La septentrional abarcaba el zodiaco y era, pues, mucho mayor que la meridional, que carece no sólo de las constelaciones inferiores sino también de las estrellas próximas al polo sur, invisibles para los observadores mediterráneos. Dentro de cada área, las constelaciones se ordenaban en grupos; seis constelaciones se alojaban en el septentrión.



Viñeta del Libro de los Muertos, del 1250 antes de Cristo

Una vez establecidas las constelaciones, importa saber hacer uso de ellas para medir el paso del tiempo y estimar las posibilidades de condiciones favorables en la labores agrícolas o la pesca. La base de esta demostración reside en el sistema de cuatro círculos que los matemáticos han trazado sobre la esfera celeste al objeto de tender puntos de referencia en la definición de la posición aparente del sol en relación a las estrellas fijas y al momento del año. El firmamento gira en torno a un eje fijo que atraviesa el centro de la Tierra y termina en los polos celestes, el polo sur, que se nos esconde, y el polo norte que es visible. No parece inquietarle el movimiento errante de los cinco planetas, pues nada informa de la medición del tiempo o la sucesión de las estaciones. Los otros dos "planetas" restantes de los griegos (la Luna y el Sol) sí intervienen en la predicción del tiempo, razón por la cual les dedica cierta atención en el poema.

Aunque la influencia de Hipócrates y la de Aristóteles persisten en los siglos siguientes, en ningún autor y obra convergen ambas con la claridad que lo hacen en la teoría física de la composición de los cuerpos, asunto nuclear del libro cuya edición crítica ha preparado Phillip de Lacy, *Galen. On the Elements*. El de Pérgamo dominará largos siglos la cultura mediterránea, europea luego, gracias a los árabes. Por una sólida razón: en el *De elementis* halló la medicina árabe el sustrato que necesitaba para sus descripciones morfológicas, clínicas y terapéuticas. No lo vio Galeno de otra manera y por eso le concede un carácter propedéutico.

La tradición árabe del escrito sobre los elementos de acuerdo con la doctrina de Hipócrates empieza con Hunayn ibn Ishaq (808-873). Le adelanta éste en carta a Ali ibn Yahya que el tratado consta de un libro y se propone explicar que todos los cuerpos están sometidos a generación y corrupción y que constan de los cuatro elementos, aire, agua, tierra y fuego. A estos elementos primarios, muy alejados del organismo humano, prosigue, hemos de sumar los elementos secundarios, los cuatro humores, de que se componen nuestro cuerpo y el de todos los animales dotados de sangre: flema, sangre y las dos bilis.

Galeno ordena los elementos en función de sus cualidades. El fuego, que es cálido y seco, halla su par antagónico en el agua, fría y húmeda; el antagónico de la tierra, fría y seca, es el aire, cálido y húmedo. Ahora bien, puesto que en cada elemento domina una de las dos cualidades, el paralelismo puede establecerse de forma más sencilla como fuego (caliente) y agua (frío), tierra (seca) y aire (húmedo).



Symphytum officinale *L. o* S. bulbosum *L., según aparece ilustrado en el Codex Ayasofia 3707 de la obra de Dioscórides* De materia medica

Sin la doctrina expuesta en *De elementis* no entenderíamos su farmacología, recogida en *De simplicium medicamentorum temperamentis ac facultatibus, De compositione medicamentorum secundum locos, De compositione medicamentorum per genera* y *De antidotis*. Galeno, por lo que a los remedios se refiere, depende también de Hipócrates, aunque las recetas aportadas están tomadas de médicos posteriores. Para deshacer esa paradoja aparente Jouanna y Veronique Boundon redactaron una ponencia que presentaron en el Quinto Coloquio Internacional sobre Galeno celebrado en Lille en 1995, en el que se basa *Galen on Pharmacology*. En su opinión la filiación hipocrática, si bien manifiesta en los remedios y en la terminología, es, sobre todo, metodológica. Frente a la escuelas de su tiempo, el método que se propone seguir es el "verdadero", el "hipocrático", es decir, el que liga la experiencia (*empeiría*) y la razón (*lógos*). Los farmacólogos anteriores a Galeno se habían ocupado del cómo, cuestión a la que respondían a través de puntillosos recetarios; él se propone inquirir el por qué.

Galeno, que ocupa un puesto de honor en la historia de la lógica, aplicó los principios de la argumentación a la inferencia farmacológica. Lo mismo que en medicina, la lógica galénica, tradicional en buena medida, contiene elementos novedosos. A las dos silogísticas conocidas —la silogística categórica de Aristóteles y la silogística hipotética de los estoicos— agrega un tercer tipo de inferencia que él denominó la silogística de las relaciones. El lógico debe empezar por los términos, por acotar también el significado de las palabras, a fin de evitar la anfibología y otros vicios del lenguaje. Distingue entre el sentido literal de las palabras, o *kyrion*, y el sentido traslaticio, o *catachrésis*. La claridad debe ser la virtud primaria del lenguaje. Nada peor para la acción farmacológica que la ambigüedad. Esta puede aparecer, sobre todo, en la identificación de las plantas. En muchas ocasiones nace de la sinonimia, en otras de la homonimia.

Amén de precisión terminológica y disciplina mental, Galeno pide al médico una experiencia cualificada. No hay que olvidar que una misma substancia puede actuar como fármaco, como alimento e incluso como veneno; todo depende de si preserva el cuerpo en el estado en que se encuentra o promueve un cambio. Entre las drogas y sus constituyentes distingue a veces entre las eficaces (*drastikós*, *praktikós*), las ineficaces (*apraktos*, *adanes*) e

inútiles (*achrestos*). No es fácil determinar si un ingrediente es o no eficaz. La determinación errónea lleva a menudo a un tratamiento ineficaz. Dificultad que se complica porque un ingrediente de suyo ineficaz puede adquirir eficacia cuando se combina con otro, o porque una droga ineficaz en un caso puede resultar eficaz en otro. Incluso en una misma planta sus partes diversas (corteza, raíz, hojas, tallo, flores o frutos) despliegan grados distintos de eficacia. Hay, pues, muchas fuentes de error en la preparación de los *pharmaka*. En cualquier caso la proporción cuantitativa correcta de todos los ingredientes (*symmetría*) de un fármaco compuesto resulta esencial para su eficacia.

Además, es capital, afirma en cierto momento, saber si el medicamento en cuestión es de una sustancia ligera (*leptomeres*) o espesa (*paquimeres*), rara o densa. Lejos de ser secundarias, estas categorías son principales. La sustancia leptómera se define por la finura (pequeñez o ligereza) de sus partes, en tanto que la paquímera está constituida por partes gruesas. Cuando se trata de un líquido, la leptomería evoca fluidez y solubilidad; es el caso del agua o del vinagre. Cuando se trata de un sólido, la leptomería evoca friabilidad, es decir capacidad de una sustancia de ser desmenuzada en finas partículas, en polvo incluso. No hay tras la leptomería una filosofía natural de átomos y vacío, sino una referencia directa a la facilidad en dividirse en partes menudas. Las partes leptómeras suelen ir asociadas al calor, puesto que el calor disgrega la materia. En el campo de la fisiología, sustancias leptómeras son sangre, pneuma, humores, residuos.

El pensamiento de Galeno se extracta en las enciclopedias bizantinas. De éstas alcanzó resonancia secular la *Colección médica* de Oribasio. Los libros 1 y 4, recuperados en *Dieting for an Emperor*, se ocupan principalmente de cereales y su manipulación. Oribasio nació en Pérgamo en torno al 320. Fue discípulo de Zenón de Chipre y entró de joven al servicio del emperador Juliano. De Oribasio se dice que es el autor a quien nadie le interesa leer, mucho menos citar, pero que es imprescindible consultar por la fidelidad y multiplicidad de sus fuentes.

La dietética, el régimen, era el otro pivote de la terapéutica clásica. En efecto, para restablecer la simetría, Galeno recomendaba los fármacos o la dieta. Dieta tiene en él no sólo el sentido de régimen alimentario sino también de ejercicio físico: baños, sueño, paseo. Scribonius Largus escalona las divisiones progresivas de la medicina en dieta, luego fármacos y, por último, cirugía y cauterización. Desde el tratado hipocrático *Sobre el régimen*, Oribasio dispone, pues, de abundante material donde espigar.

Aunque el libro 1, por ejemplo, sea un resumen del galénico *De facultatibus in alimentis* J. Raeder no se limita en su comentario a un cotejo de textos, sino que ha ido más allá, en busca de un paralelismo de las recetas y las técnicas de cocina con las culturas mediterráneas modernas, del Oriente Medio y africanas. Las notas del editor son completas. Exponen en su pormenor lo mismo un proceso de preparación del pan que la identificación de una planta escurridiza, como la mayoría de las cucurbitáceas, o las variedades de orégano, parásitos y compuestos minerales.

LUIS ALONSO

Computadores

Manual universitario

INTRODUCCIÓN A LA ARQUITECTURA DE COMPUTADORES, por Javier Bastida Ibáñez. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Valladolid; Valladolid, 1995.

Como indica el autor en su prólogo, el propósito de este libro es acercar al lector al funcionamiento interno de los computadores. Se trata de un libro de texto destinado a los alumnos de "Estructura y Tecnología de Computadores" y que es troncal para los planes de estudio correspondiente a las titulaciones de ingeniero en informática, ingeniero técnico en informática de sistemas e ingeniero técnico en informática de gestión.

Es cada vez más frecuente que los profesores que imparten estas materias intenten suministrar a sus alumnos libros de texto en castellano y que se adapten lo más exactamente posible a los temarios, para facilitar al máximo el aprendizaje de unas materias que no disponen de muchos manuales propios que se adapten al nivel y a las necesidades de los nuevos planes de estudio.

El nivel con que se trata alguno de los temas es ligeramente superior al que correspondería a asignaturas que se cursan normalmente en segundo o tercer curso, pero puede ser útil para aquellos que deseen profundizar en algún tema concreto.

Este libro se ha estructurado en dos grandes bloques. El primero hace referencia al computador, analizado desde el punto de vista exterior al soporte físico y se ha denominado "Organización del computador". En esta parte se incluyen formatos de instrucción, modos de direccionamiento y conjuntos de instrucciones. En el segundo bloque, denominado "Bloques funcionales del computador", se estudia el funcionamiento interno de cada una de las partes del computador: memoria central, la unidad aritmético-lógica, algoritmos aritméticos, la unidad de control, microprogramación, organización de la entrada/salida y buses e interfaces de entrada/salida.

Es de destacar la abundancia de figuras y diagramas como apoyo y complemento del texto. También cabe resaltar el uso de listados en Pascal y en C para ilustrar la ejecución de las instrucciones o la interpretación de las instrucciones en la unidad de control. Por ello es conveniente que el lector posea algún conocimiento acerca de estos lenguajes, si bien no resulta realmente imprescindible para su correcta asimilación.

Completan el libro una colección de apéndices, que incluyen resúmenes del lenguaje ensamblador y del juego de instrucciones de los computadores PDP-11, VAX, MC68000 y Z80, ampliamente utilizados por el autor en los ejemplos, cuestiones y problemas que se incluyen en los capítulos del libro. También se incluye un pequeño listado de la bibliografía existente sobre estas materias, si bien cabe indicar que no es muy extenso y existen pocos libros recientes en este resumen.

El enfoque que se da en el libro es bastante clásico y similar al empleado por Hamacher en la mayoría de los temas, lo que resulta bastante didáctico, pero algunos de los computadores que se utilizan para ilustrar los conceptos, como el VAX y el PDP-11, resultan hoy en día algo anticuados y no se corresponden con las actuales arquitecturas. Esperemos que en las posteriores ediciones del libro se incluyan nuevas máquinas como RISC que se utilizan en los libros de Patterson y Hennessy como ejemplos de trabajo. Por lo demás, el libro está bastante bien escrito y su estilo expositivo es claro e inteligible.

GINÉS BENET GILABERT

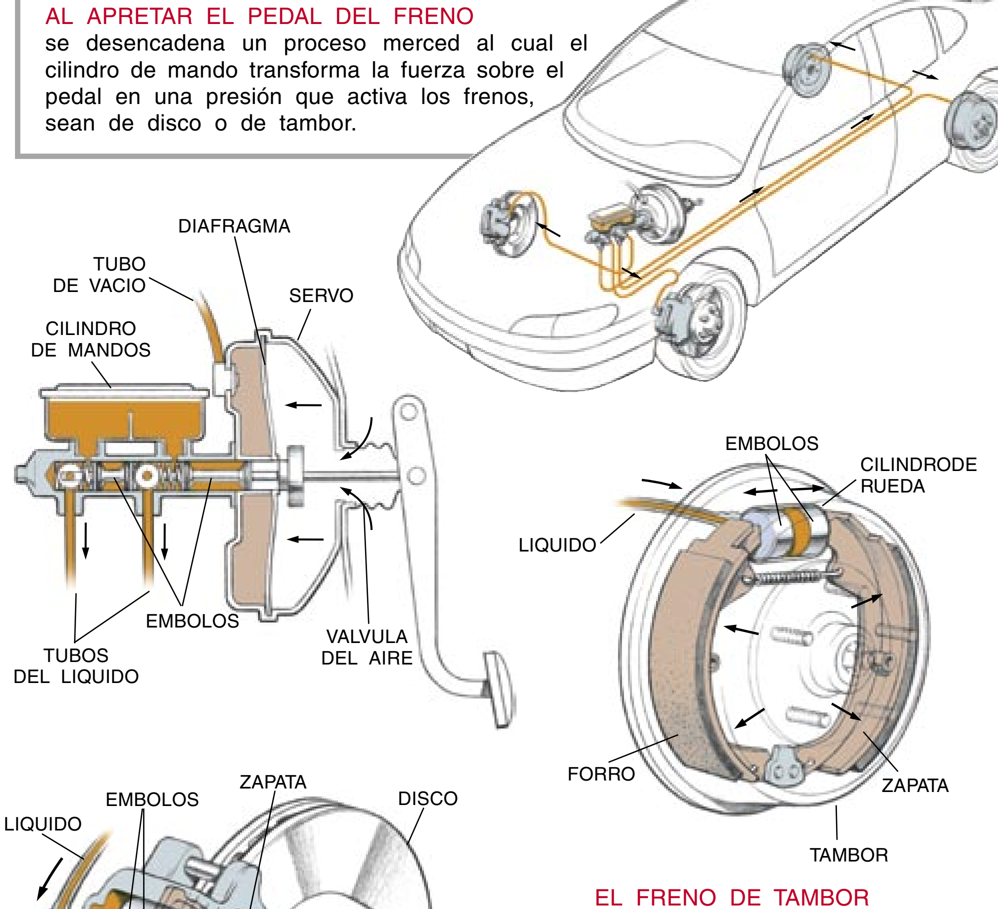
IDEAS APLICADAS

Stanley L. Stokes

Frenos hidráulicos

Los frenos hidráulicos representan un papel crucial en la seguridad de funcionamiento de los vehículos. Hasta los años treinta, la mayoría de los sistemas de frenos se basaban exclusivamente en la fuerza del pie del conductor sobre el pedal del freno. Varillas o cables dirigían esa fuerza para oprimir unas zapatas contra un tambor, con lo que las ruedas perdían velocidad. Por contra, los sistemas de frenos hidráulicos hacen uso de líquido a presión para aplicar unas fuerzas de frenado más intensas y uniformes. Al apretar el pedal del freno se activan los émbolos del cilindro de mando, transformando así la fuerza aplicada en el pedal en presión que se transmite por el circuito hidráulico para hacer que los émbolos de los cilindros de rueda activen los frenos, sean de tambor o de disco. Entonces, como el área del cilindro de rueda es mayor que el área del cilindro de mando, la fuerza aplicada se amplifica.

En los años cincuenta la aparición de los frenos de potencia, que aumentan la presión hidráulica, redujo además el esfuerzo requerido al conductor. Para mayor seguridad, en los frenos modernos se divide el circuito hidráulico como prevención de una pérdida total de frenado por fallo de un subcircuito. El líquido penetra en los frenos cuando se activan los émbolos del cilindro de mando. Cada émbolo actúa sólo sobre una pareja de ruedas. En los modelos más recientes, cada subcircuito encamina el líquido a una pareja de ruedas diagonalmente opuestas y no a la pareja delantera y a la trasera. Esta solución asegura un frenado más equilibrado en caso de avería de un subcircuito, dotando así de un cierto grado de redundancia a uno de los mecanismos de seguridad más importantes del automóvil.



AL APRETAR EL PEDAL DEL FRENO se desencadena un proceso merced al cual el cilindro de mando transforma la fuerza sobre el pedal en una presión que activa los frenos, sean de disco o de tambor.

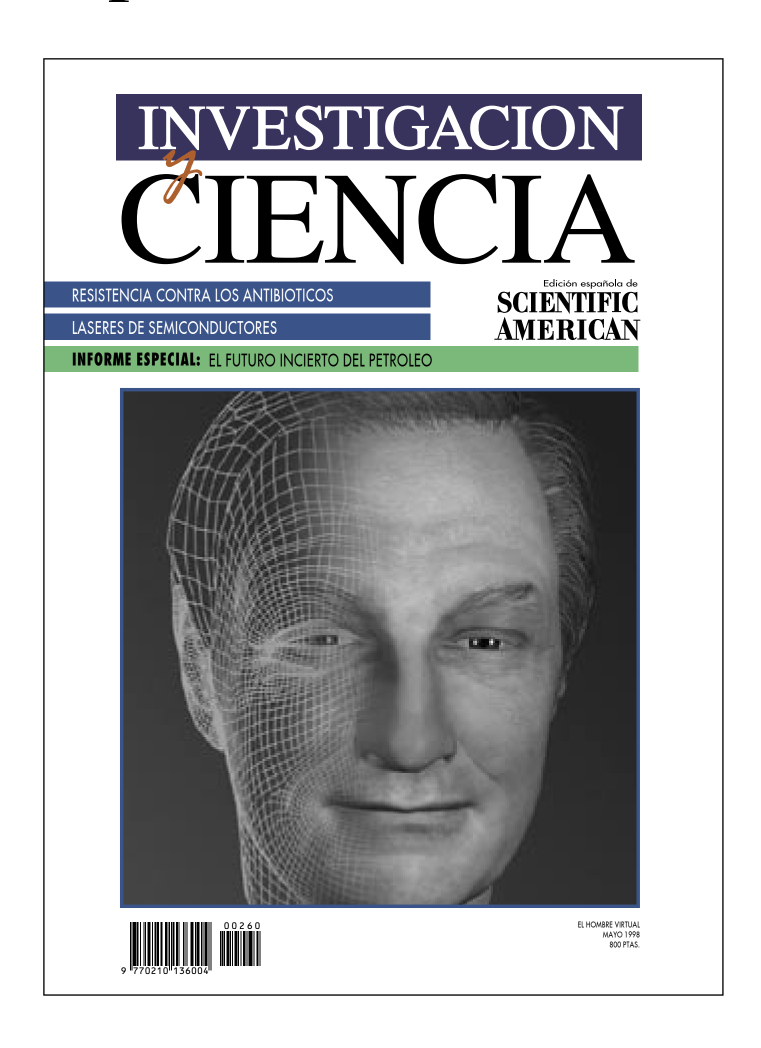
EL FRENO DE POTENCIA se basa en un cilindro de mando y un servo integrados en una unidad. Cuando el pedal del freno no está accionado, el diafragma de gran superficie permanece rodeado de vacío. Al apretar el pedal, éste abre una válvula que permite la entrada de aire a un lado del diafragma, restaurando la presión atmosférica. La diferencia de presión entre ambos lados del diafragma fuerza a éste hacia adentro, accionando los émbolos del cilindro de mando. Con esto entra en acción el circuito hidráulico. El líquido de frenos desplazado por ese movimiento acciona los émbolos de los cilindros en cada rueda y éstos, a su vez, aplican los frenos, sean de tambor o de disco.

EL FRENO DE DISCO se monta en una rueda delantera, donde más se necesita disipar el calor generado por el rozamiento provocado durante el frenado. Los émbolos del calibrador obligan a los forros de la superficie de la zapata a apretarse contra ambas caras de un disco metálico (o rotor). Con el rozamiento disminuye la velocidad de giro del rotor y la de la rueda de la que es solidario. Algunos modelos recientes están equipados con frenos de disco en las cuatro ruedas.

EMBOLOS
ZAPATA
DISCO
LIQUIDO
CALIBRADOR

EL FRENO DE TAMBOR habitualmente instalado en una rueda trasera se compone de un cilindro montado entre los extremos móviles de dos zapatas. Cuando se acciona el pedal, los dos émbolos del pistón impulsan las zapatas hacia afuera y contra el tambor. Los forros de las zapatas oprimen la superficie interna del tambor. Entonces, el consiguiente rozamiento detiene la rotación de la rueda.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



EL CONDENSADO BOSE-EINSTEIN, por Eric A. Cornell y Carl E. Wieman

En un laboratorio de Colorado un viejo sueño se hizo real hace tres años. Desde entonces, el universo cuántico vive más cerca del mundo cotidiano.

NANOLASERES, por Paul L. Gourley

Los láseres de semiconductor han alcanzado dimensiones incluso menores que la longitud de onda de la luz que emiten. En esta región se manifiesta el comportamiento cuántico, posibilitando dispositivos más eficientes y rápidos.

LA ANIMACION DEL MOVIMIENTO HUMANO, por Jessica K. Hodkins

La animación por ordenador se acerca cada vez más al mundo real. Mediante simulación, una técnica basada en las leyes de la física, se han creado seres humanos virtuales que corren, saltan, nadan y pedalean.

EL COMERCIO DEL CAIMAN, por Peter Brazaitis, Myrna E. Watanabe y George Amato

El contrabando de piel de caimán demuestra que la utilización prudente de especies en peligro de extinción no constituye ninguna medida de prudencia.

ANTIGENOS ESPECIFICOS DEL SEXO, por Antonio Sánchez, Rafael Jiménez, Miguel Burgos y Rafael Díez de la Guardia

Considerados antaño responsables de promover la diferenciación testicular embrionaria, su verdadera función y modo de actuación están aún por dilucidar.

EL DESAFIO DE LA RESISTENCIA CONTRA LOS ANTIBIOTICOS, por Stuart B. Levy

Ciertas infecciones bacterianas han adquirido capacidad para plantar cara a cualquier antibiótico. El problema de la resistencia se puede revertir sólo si la sociedad empieza a tomar en consideración que los fármacos afectan por igual a las bacterias "buenas" y a las "malas".

INFORME ESPECIAL:

¿SE ACABO EL PETROLEO BARATO? por Colin J. Campbell y Jean H. Laherrère

MINERIA DEL PETROLEO, por Richard L. George

PRODUCCION DE PETROLEO EN EL SIGLO XXI, por Roger N. Anderson

COMBUSTIBLES LIQUIDOS A PARTIR DEL GAS NATURAL, por Safaa A. Fouda

